

Részecskefizikai problémák: Higgs-bozon, antianyag, neutrínók

*Tudomány és Művészet Kórélettana,
Semmelweis Egyetem, 2018.03.07.*

Horváth Dezső

horvath.dezso@wigner.mta.hu

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske- és Magfizikai Intézet, Budapest
és MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

Vázlat

- Mire megy ki a játék?
(Mire jó a standard modell és mire nem?)
- A CERN nagy hadron-ütköztetője
(*Large Hadron Collider, LHC*)
- *Elveszett* szimmetriák: A Higgs-bozon felfedezése
- A standard modell problémái: Szuperszimmetria?
- Az antianyag hova lett?
Az antiproton-lassító és kísérletei
- Neutrínó-rejtélyek: Napból, légkörből
Megoldás: ízrezgés, *de mi rezegteti??*
Neutrínótömeg: *hova tegyük?*
- A részecskefizika haszna

Előszó

A (részecske)fizika egzakt tudomány:

- A fizika univerzális nyelve a matematika, pontos matematikai formalizmuson alapszik.
- Egy elmélet érvényes, ha kiszámítható, és eredménye egyezik a kísérlettel.
- Az igazi fogalmak mérhető mennyiségek, a szavak csak mankók.

Szavak mögött pontos matematika és kísérleti tapasztalat

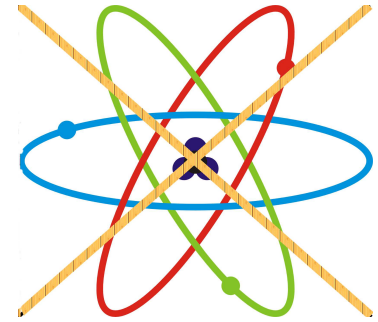
Alapkérdés: milyen pontossággal adja vissza az elméleti számítás a mérések eredményét?

Számítás nélkül nincs fizika, csak spekuláció....

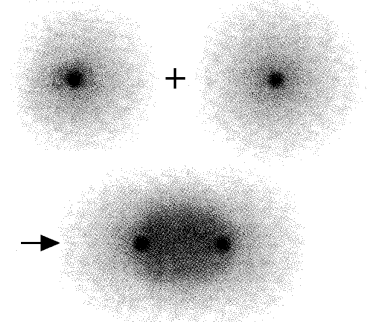
de a fizika kísérleti tudomány!

Kvantumfizika: valószínűségi leírás

- Einstein: *Isten nem dob kockát!* De mégis: minden kísérleti tény igazolja, pedig nem szemléletes
- Egyetlen *pontszerű* elektron egy fésű minden részén egyszerre átmegy
- Az anyag atomokból áll, bennük a nehéz atommag körül pontszerű elektronok „keringenek”, de igazából nem mozognak, csak megjelennek az útvonal pontjain különböző valószínűséggel.
- Nem tudjuk, egy bomlékony részecske mikor fog elbomlani, csak azt, hogy adott időn belül mekkora valószínűséggel bomlik.



Az elektron
nem kering

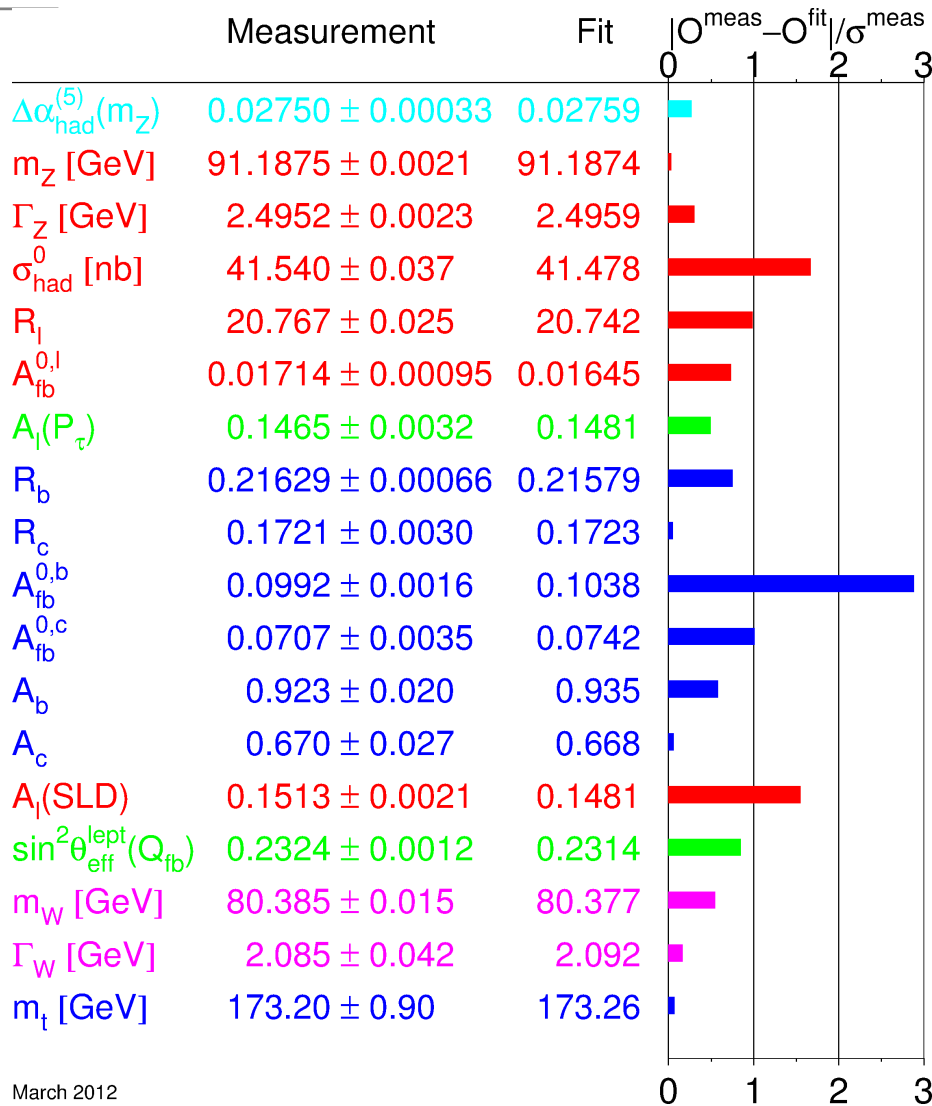


Hidrogén-
molekula

A szavak sántítanak, de a matematikai leírás minden mérhető adatot szépen visszaad.

R. Feynman: *Hallgass és számolj!*

A standard modell diadalmenete



March 2012

Állapot 2012 óta

Valamennyi kísérlet
sokszáz mérésének
összesítése:

$|Mért\text{-számolt}|/szórás$

Kilógó adat:



előre-hátra aszimmetriája

LEP Elektroyenge munkacsoport:

<http://lepewwg.web.cern.ch/>

Problémák: Óriási matematikai korrekciók, sötét anyag, neutrínótömegek,
antianyag hiánya...

A mikrovilág vizsgálata: nagy energia

Tárgy	méret, m	energia	eszköz
kicsi	10^{-3}		kis mikroszkóp
baktérium	10^{-5}		nagy mikroszkóp
λ (fény)	10^{-7}	1 eV	
atom	10^{-10}	10^3 eV	elektron-mikroszkóp
atommag	10^{-14}	10^9 eV	részecskegyorsító
elektron	$< 10^{-18}$	10^{12} eV	protonütköztető

1 elektron-volt (eV) = kinetikus energia, amelyet 1 V feszültség átszelésekor szerez egy elektron

Részecske = hullám.

Nagyobb energia \Rightarrow rövidebb hullámhossz \Rightarrow
kisebb távolság \Rightarrow mélyebb szerkezet

A részecskefizika állatkertje



Utolsónak felfedezve: Higgs-részecske (LHC, 2012)

The twenty two Member States of CERN

Member States (date of accession)

-  Austria (1959)
-  Belgium (1953)
-  Bulgaria (1999)
-  Czech Republic (1993)
-  Denmark (1953)
-  Finland (1991)
-  France (1953)
-  Germany (1953)
-  Greece (1953)
-  Hungary (1992)
-  Israel (2014)
-  Italy (1953)
-  Netherlands (1953)
-  Norway (1953)
-  Poland (1991)
-  Portugal (1986)
-  Romania (2016)
-  Slovakia (1993)
-  Spain (1961-1968, 1983-)
-  Sweden (1953)
-  Switzerland (1953)
-  United Kingdom (1953)



A CERN többi résztvevő országa

Jugoszlávia alapító tag volt 1954-ben, de 1961-ben kilépett.

Nagy-Britannia nem lép ki.

Utoljára csatlakozott: **Izrael: 2014; Románia: 2016:**

Ciprus, Szerbia, Szlovénia: tagjelöltek

Töröko., Pakisztán, Ukrajna, India: csatlakozók

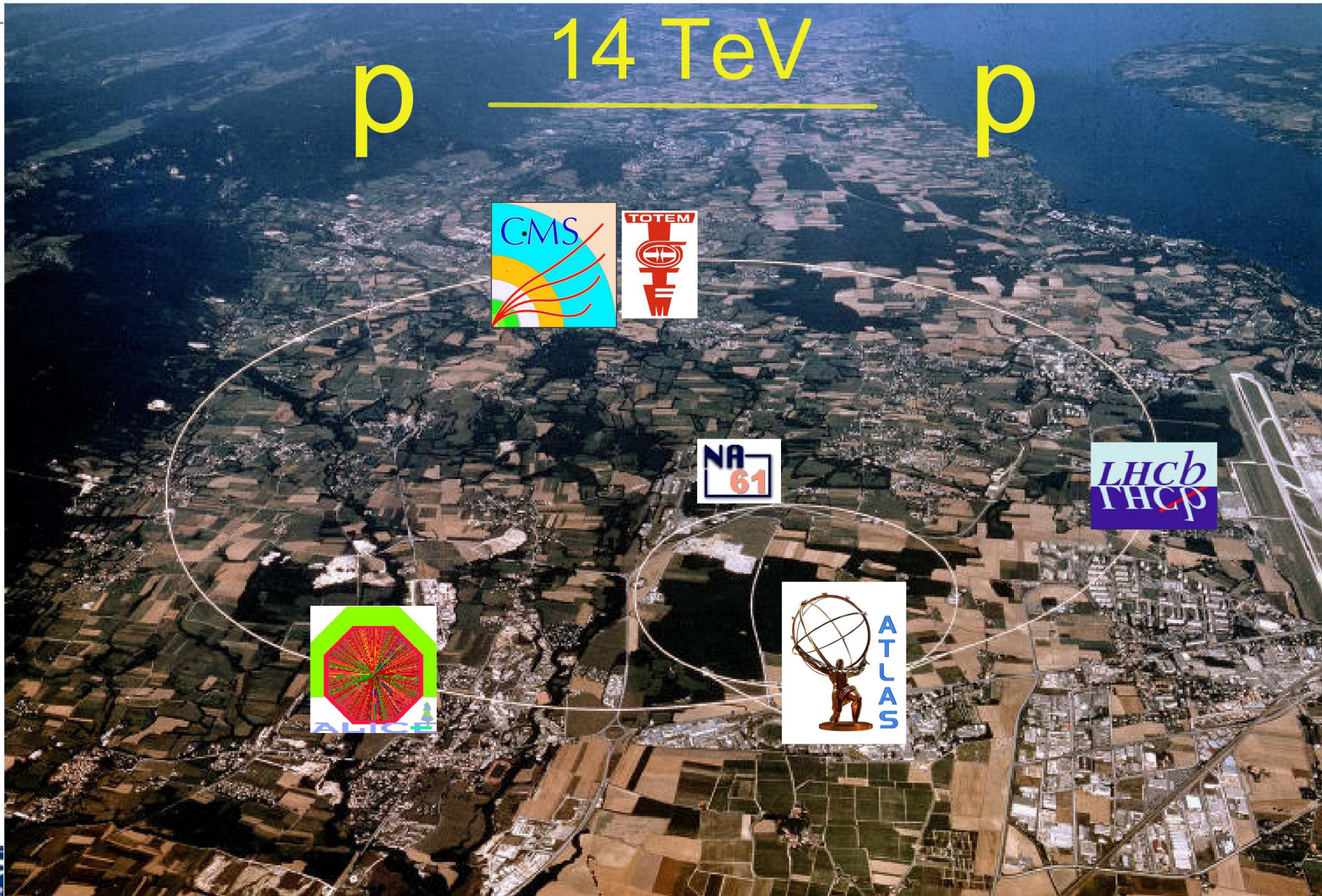
Japán, Oroszország, USA: társult országok

EAI (Dubna), EU Bizottság, UNESCO: megfigyelők

A többi 72 ország intézetenként konkrét kísérletekbe száll be, esetleg csak pár résztvevőt küld más ország (leginkább az USA) színeiben.



A CERN és környéke



A CERN kutatói (felhasználói), 2016

Distribution of All CERN Users by Nationality on 12 January 2016



MEMBER STATES	
7319	
Austria	106
Belgium	125
Bulgaria	88
Czech Republic	217
Denmark	56
Finland	102
France	858
Germany	1267
Greece	216
Hungary	79
Israel	63
Italy	1974
Netherlands	164
Norway	63
Poland	302
Portugal	113
Slovakia	111
Spain	399
Sweden	90
Switzerland	220
United Kingdom	706

ASSOCIATE MEMBERS	
Pakistan	58
Turkey	166
224	

OBSERVERS	
2775	
India	284
Japan	316
Russia	1071
USA	1104

STATES IN ACCESSION TO MEMBERSHIP	
195	
Cyprus	19
Romania	131
Serbia	45

OTHERS													
Albania	4	Bosnia & Herzegovina	1	Ecuador	4	Kazakhstan	1	Malta	5	Qatar	1	Thailand	
Algeria	8	Brazil	135	Egypt	24	Kenya	2	Mauritius	1	San Marino	1	T.F.Y.R.D.	
Argentina	24	Cameroon	2	El Salvador	1	Korea, D.P.R.	4	Mexico	84	Saudi Arabia	1	Tunisia	
Armenia	27	Canada	154	Estonia	15	Korea Rep.	151	Montenegro	2	Senegal	1	Ukraine	
Australia	31	Central African Rep.	1	Georgia	44	Latvia	1	Morocco	13	Singapore	3	Uzbekist	
Azerbaijan	11	Chile	20	Iceland	4	Lebanon	12	Nepal	7	Sint Maarten	1	Venezuel	
Bangladesh	7	China	421	Indonesia	10	Libya	1	New Zealand	6	Slovenia	27	Viet Nam	
Belarus	50	Colombia	38	Iran	54	Lithuania	30	Oman	1	South Africa	31	Zimbabw	
Bolivia	2	Costa Rica	1	Iraq	1	Luxembourg	2	Palestine (O.T.)	7	Sri Lanka	3		
		Croatia	38	Ireland	20	Madagascar	4	Peru	6	Syria	1		
		Cuba	13	Jordan	8	Malaysia	18	Philippines	4	Taiwan	56	18	

MEMBER STATES	
7319	
Austria	106
Belgium	125
Bulgaria	88
Czech Republic	217
Denmark	56
Finland	102
France	858
Germany	1267
Greece	216
Hungary	79
Israel	63
Italy	1974
Netherlands	164
Norway	63
Poland	302
Portugal	113
Slovakia	111
Spain	399
Sweden	90
Switzerland	220
United Kingdom	706

2531 alkalmazott, 645 ösztöndíjas + 12610 kutató + 518 diák (MSc, PhD)
 (Össz: 16304 fő, olasz > német > amerikai > orosz > francia)



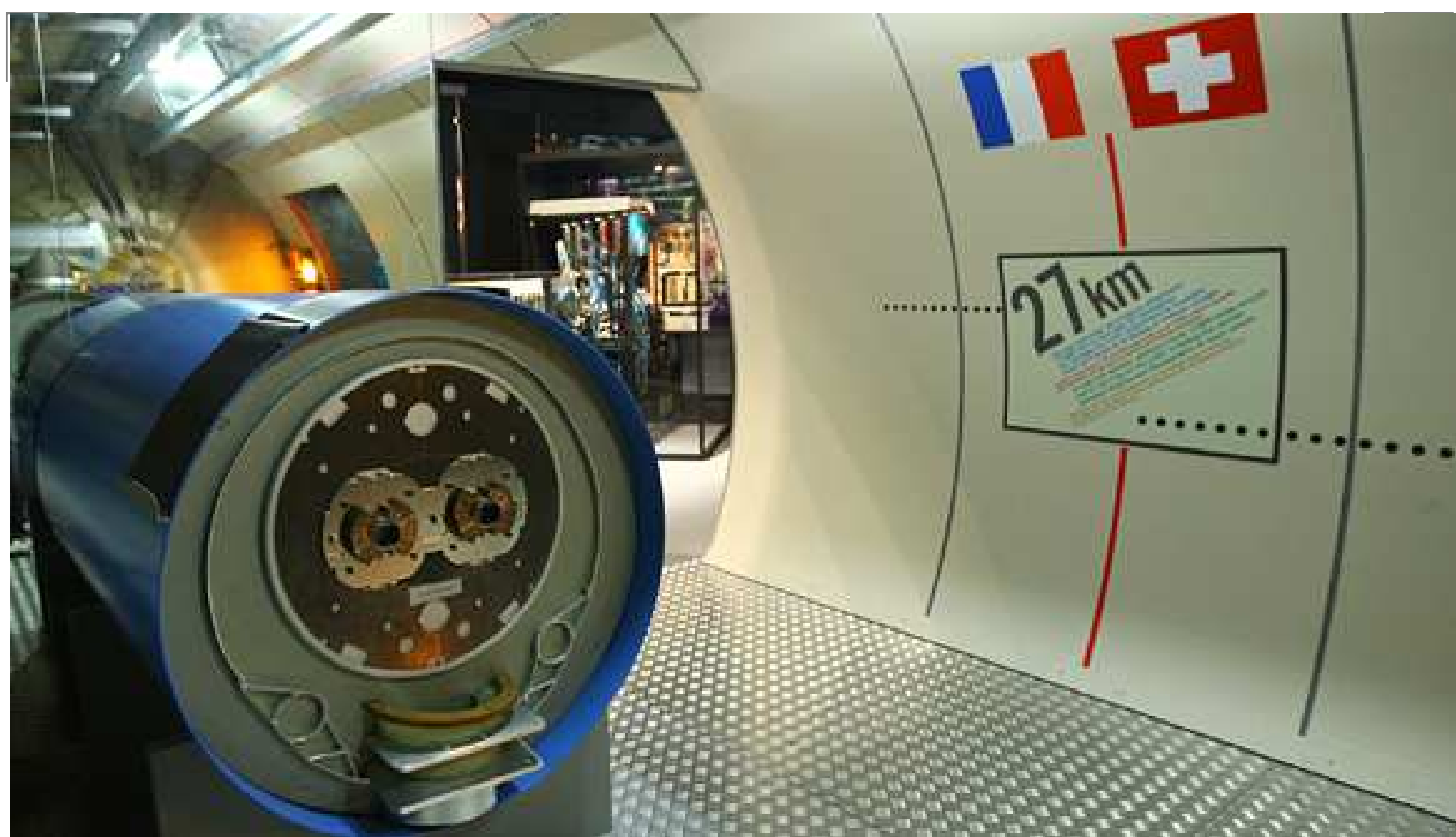
LHC: 1232 eltérítő-mágnes



Large Hadron Collider, Nagy hadron-ütköztető
Néhány szupravezető mágnes beszerelésre várva
($L = 15$ m, $M = 35$ t, $T = 1.9$ K, $B = 8.3$ T)



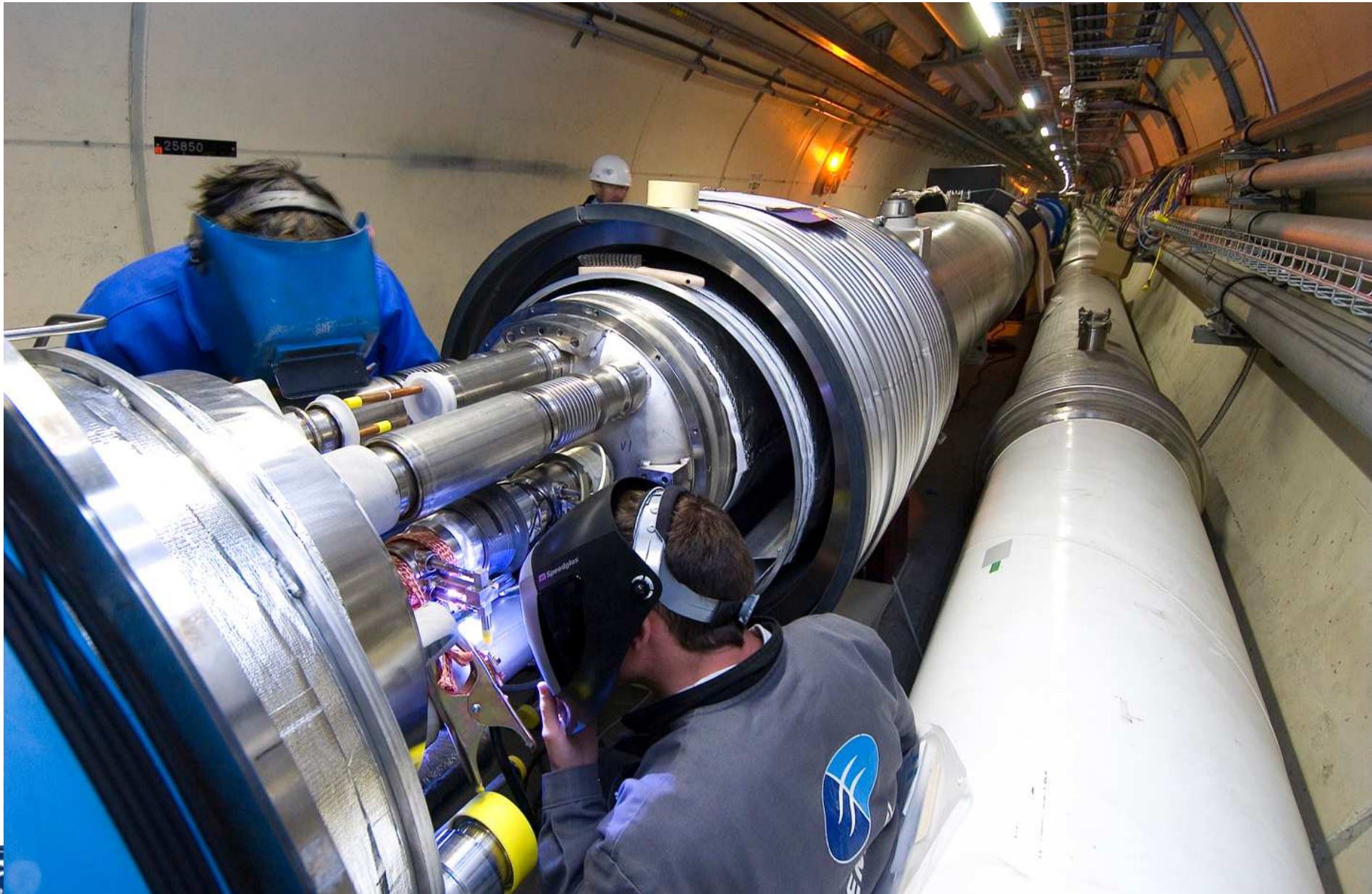
LHC eltérítő-mágnesese: keresztmetszet



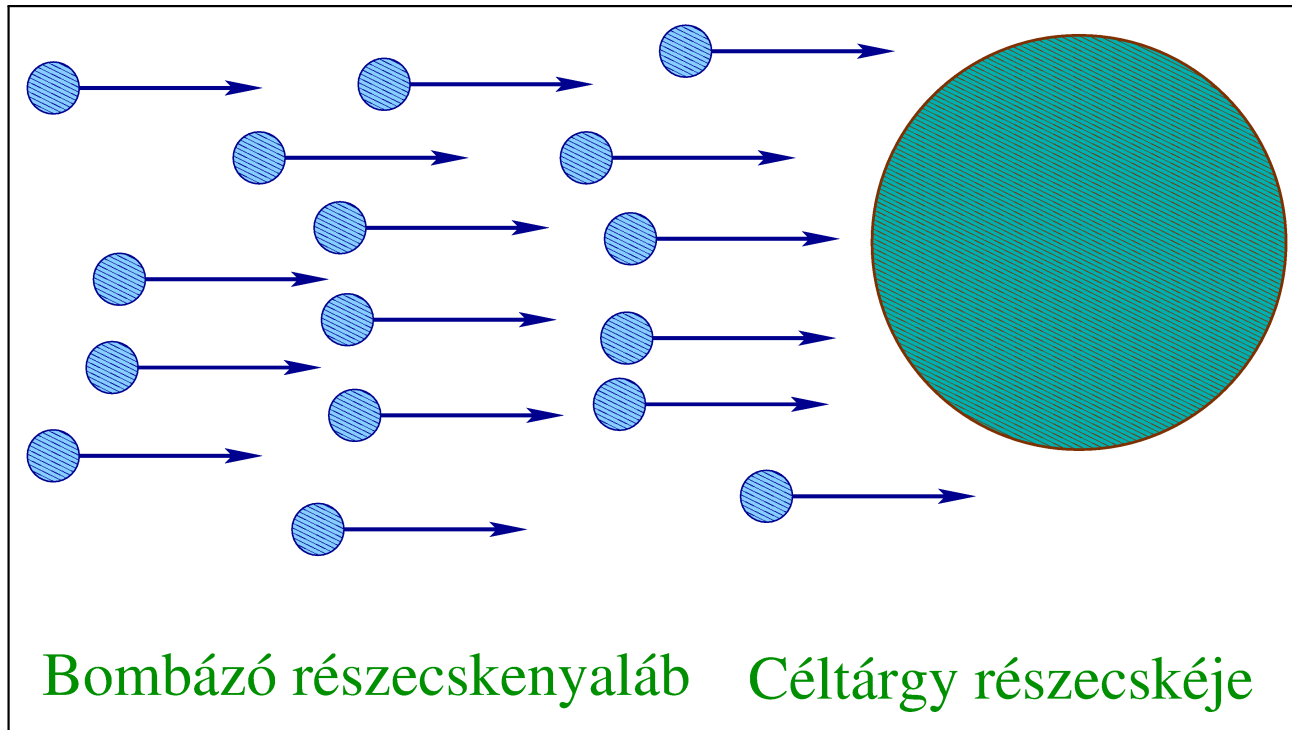
Két 27 km-es részecskegyorsító gyűrű egymással szemben!



Összekötik az LHC mágneseit

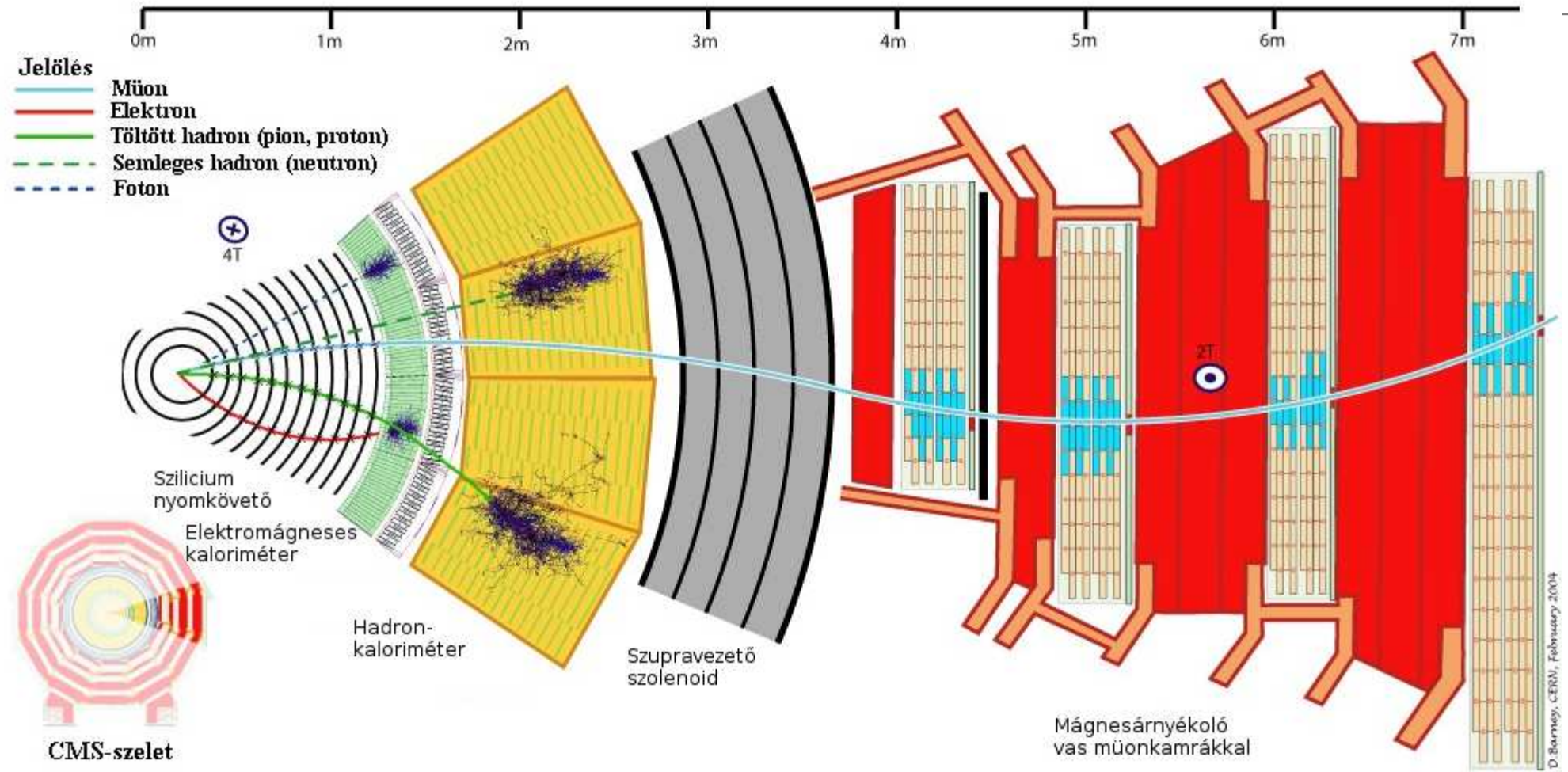


Amit mérünk: részecskék szóródása



- Belső szerkezet feltárása: hullámhossz!
- Részecskék kölcsönhatása
- Új részecskék keltése \Rightarrow új fizika?

Az LHC CMS–detektora



Compact Muon Solenoid: 14000 tonnás digitális kamera
 100 M pixel, 40 M kép/mp, 2000 GB/mp adat
 Tárolás: 1000 kép/mp \Rightarrow szűrés!!



CMS-együttműködés, 2017

- 48 ország 208 intézményéből 5384 résztvevő
- 1963 PhD-s fizikus (1637 férfi, 326 nő)
- 922 PhD-hallgató (720 férfi, 202 nő)
- 994 MSc-hallgató (753 férfi, 241 nő)
- 995 mérnök és 279 technikus
- Résztvevők intézmény országa szerint:
USA: 1513, Olaszo.: 575, Németo.: 351, Oroszo.: 312,
India: 189, Franciaó.: 186
- Útlevél szerint: USA a fele, a többi sokkal több.
- Magyar intézményből: 42, magyar útlevéllal: 46
- 64 petabyte adat, 900 publikáció átlag 2100 szerzővel

ATLAS még nagyobb: 10-szeres térfogat, fele súly, +20% résztvevő
Bonyolultabb észlelőrendszer, azonos eredmények



Munka 160 műonkamrán



Béni Noémi és Szillási Zoltán (Debrecen, 2000-2006)

HF: kvarcszálak acélban



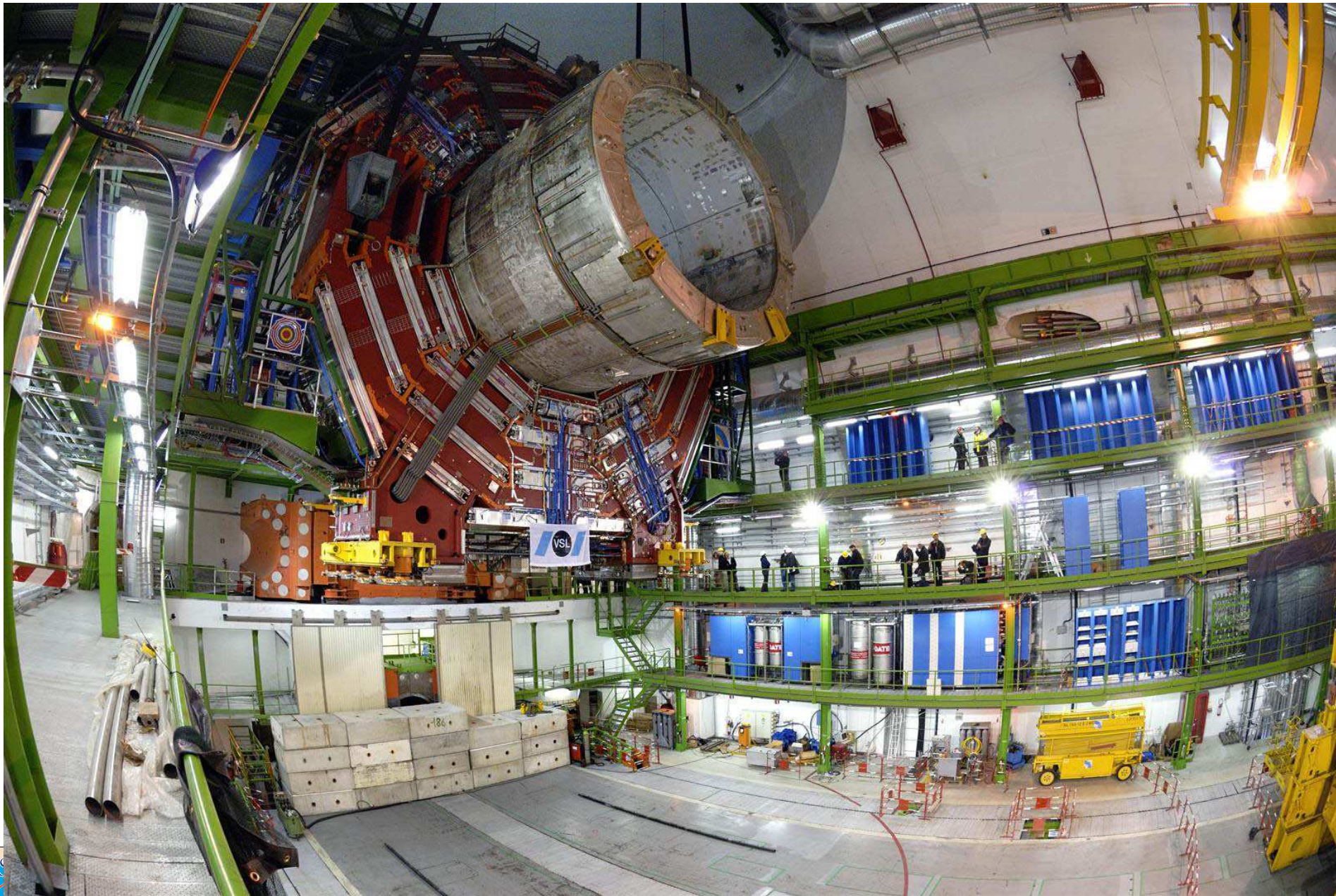
Minden CERN-es magyar fűzte

Szákalibráció kész darabon

Budapest, 2000-2006



A CMS mágnesese



CMS: elektromágneses kaloriméter



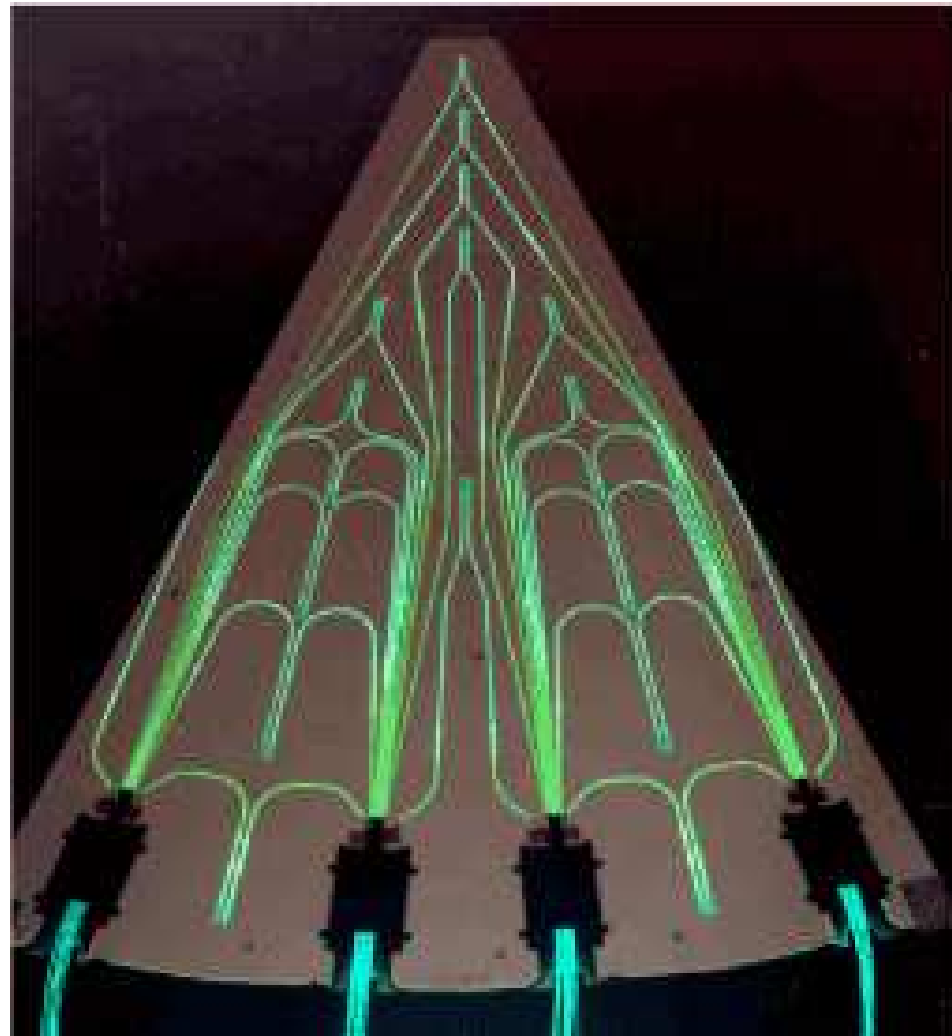
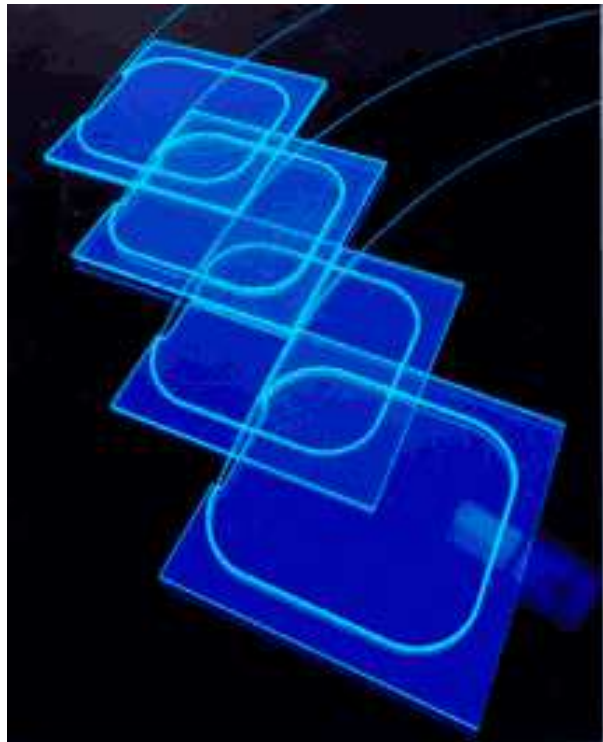
CMS ECAL: 75,848 PbWO_4 egykristály szcintillátor

CMS: hadron-kaloriméter

50 mm vastag sárgarézlemezek
között

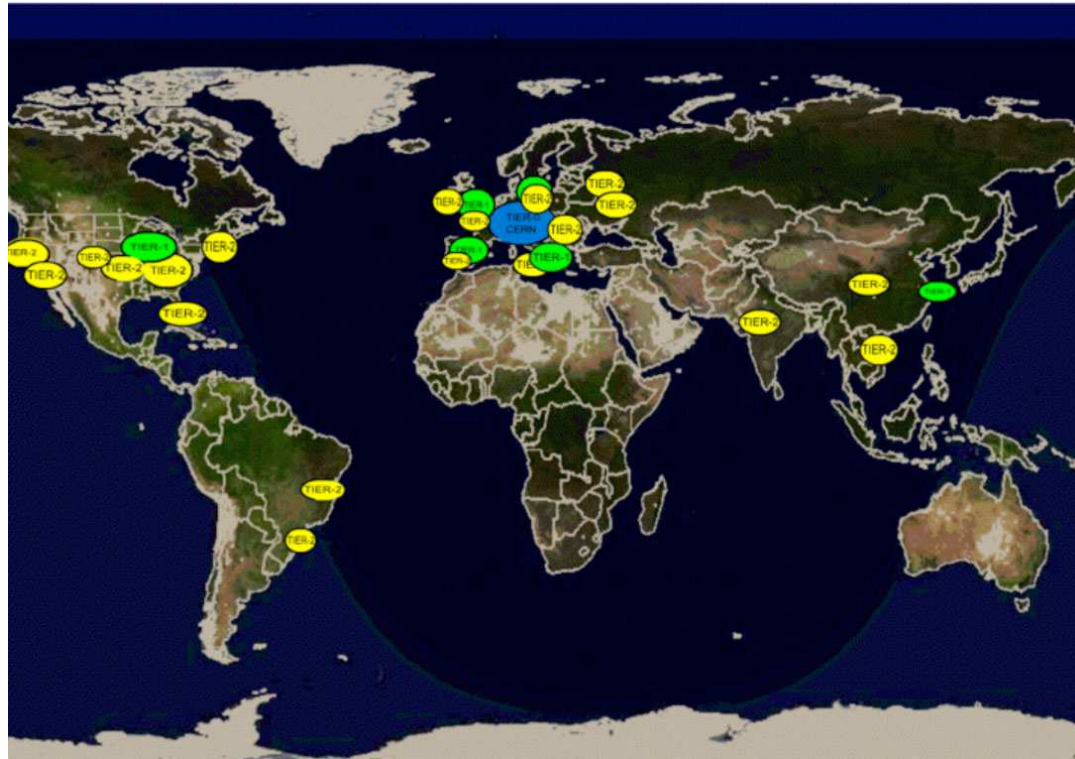
(10^6 orosz lövedék + 10^6 USD)

4 mm vastag szcinti-lapok
sci-fi kiolvasás



Worldwide LHC Computing Grid

A CMS-kísérlet fő WLCG-állomásai



Magyar Tier-2: BUDAPEST (Wigner FK, RMI)

(800 CPU-egység, 1000 TB tároló a CMS és ALICE VO számára)

2013: LHC Tier-0 egy része Wigner FK-ba települt!

Wigner Adatközpont, 2017: 325000 CPU-egység, 250 PB tároló



Viccek a Higgs-bozonról, előtte

- A bárba besétál egy Higgs-bozon.
Azt mondja neki a csapos: *Vigyázzon, magát sokan keresik!*
- A bárba besétál egy Higgs-bozon. A csapos nem érti...
- Szeretnék végre látni egy jó Higgs-bozonos viccet. Biztosan létezik, de évekbe telhet, amíg rátalálunk
- A templomba besétál egy Higgs-bozon. Azt mondja neki a pap: *Magát nem szívesen látjuk itt.. Mire ő: Pedig nélkülem itt soha nem lesz tömeg!*
Angolul: *But without me how can you have mass?*
(Mass: súlyos tömeg, embertömeg, mise)

A tárgyak tömege **NEM** a Higgs-bozontól van,
csaknem tiszta energia!

Az LHC vezérlőterme, 2008.09.10



LHC: a Jó, a Rossz és a Csúf



Jó

Hatalmas felfedezési potenciál:
nagy energia, sokféle ütközés
(acélgolyó \Leftrightarrow túrógombóc),
óriási nyalábintenzitás.



Rossz

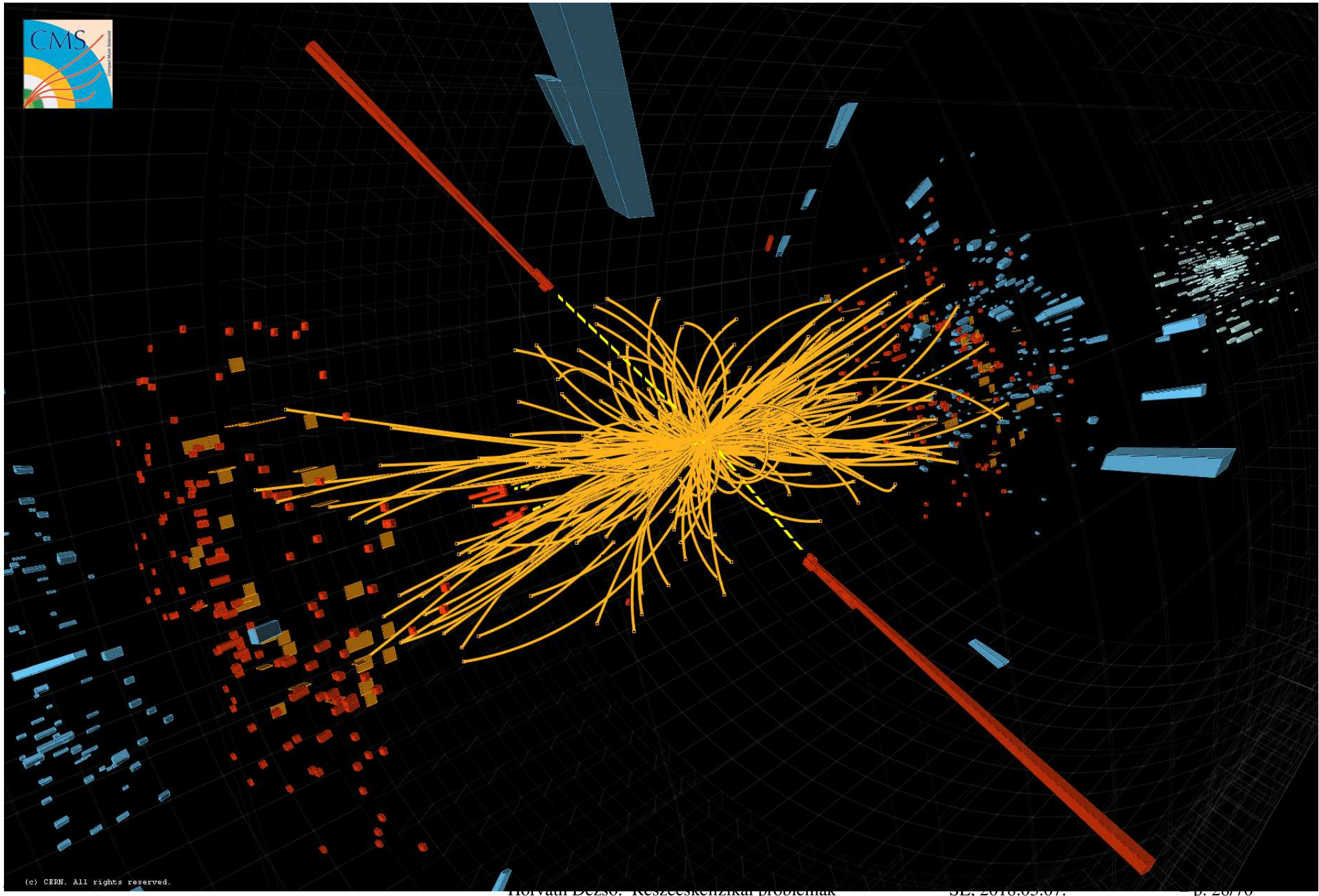
Az érdekesebb dolgok előfordulási
gyakorisága nagyon kicsi
($10^{-6} - 10^{-4}$)



Csúf

Az érdekes folyamat mellett
eseményenként még 20-50 p-p
ütközés, hatalmas kombinatorikus
háttér.

CMS-esemény: $H \rightarrow \gamma\gamma$ jelölt

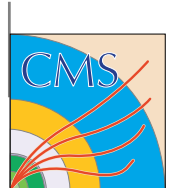


2012 július 4: valami van!

ATLAS és CMS, 7 és 8 TeV ütközési energián, $H \rightarrow \gamma\gamma$ és $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l^+l^-$ csatornában, $m \approx 125$ GeV tömegnél statisztikusan jelentősen (kísérletenként 5σ szignifikanciával) lát egy új H részecskét a SM Higgs-bozonjának megfelelő tulajdonságokkal.

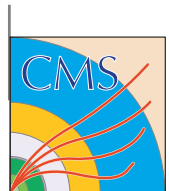


François Englert és Peter Higgs első találkozása



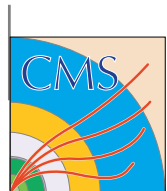
CMS: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$

CMS : $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$ animated



Hogyan jutottunk idáig?

- CMS szándéknyilatkozat: 1992 (475 szerző)
- Technikai tervek (8 többszázoldalas mű): 1995–2005
- Detektor jórészt felépítve a felszínen: 2000-2006
- Leeresztés darabokban, összerakás, befejezés: 2006-2008
- LHC elindul: 2008 (katasztrófa, javítás), majd 2009.
- 2010 → 2011: 7 TeV energia, 140-szeres adatmennyiség!
- 2011 → 2012: 7 → 8 TeV, ötszörös adatmennyiség!
- 2012: A Higgs-bozon felfedezése.
- 2013-14: A Higgs-bozon vizsgálata.
- 2015-17: 13 TeV energia, új jelenségek keresése.



A CMS irodaépülete



a detektor életnagyságú fényképével és a résztvevők egy részével



CMS-vezérlő, 2012 május 2, 15h 45p



<http://cms.web.cern.ch/content/cms-control-room-webcams>

DCS-koordinátor: Szillási Zoltán, ATOMKI; DQM-felügyelő: HD

Ügyelet: Spanyol, holland, kínai, orosz, francia, magyar

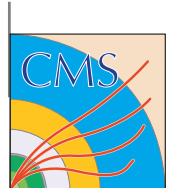


Fizikai Nobel-díj, 2013

A fizikai Nobel-díjat François Englert and Peter W. Higgs kapta „azon mechanizmus elméleti felfedezéséért, amely hozzájárul ahhoz, hogy megértsük a szubatomi részecskék tömegének eredetét, és amelyet mostanában megerősített a megjósolt alapvető részecske felfedezésével a CERN Nagy hadron-ütköztetőjénél az ATLAS és CMS kísérlet”.

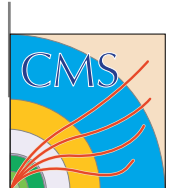


Rolf-Dieter Heuer, a CERN főigazgatója, bejelenti a Nobel-díjat az ATLAS és CMS közös irodaépületében.



Viccek a Higgs-bozonról, utána

- A bárba besétál a Higgs-bozon. Csapos: *Mi van? mire ő: Hát én!!*
- A Higgs-bozon felfedezése rossz viccek ősrobbanásához vezetett.
- A Higgs-bozon felfedezését a fizikusok *tömegesen* ünnepelték.
- Nem tudom, mi a csuda az, de klassz, hogy felfedezték!
- Gondosan ellenőrizni kell. A múltkor is azt hittem, Higgs-bozont találtam az ágyam alatt, de csak egy üveggolyó volt.
- Jó, hogy megvagy, Isten-részecske. Én csak egy átlagember vagyok, aki nem ért téged.



A részecskefizika problémái

Megvan a Higgs-bozon, minden mérés egyezik az elmélettel, minek még a CERN, a gyorsítók, sőt a részecskefizikusok??

- Gravitáció beillesztése? graviton???
- Aszimmetriák: jobb \Leftrightarrow bal világ \Leftrightarrow antivilág
- Mesterséges tömegkeltés: Higgs-mező *kívülről*
- Univerzum energia-összetétele (Planck, 2015)
 - $(4,84 \pm 0,10)$ % közönséges anyag (csillag, gáz, por, ν)
 - $(25,8 \pm 1,1)$ % láthatatlan *sötét anyag*,
 - $(69,2 \pm 1,2)$ % rejtélyes *sötét energia*

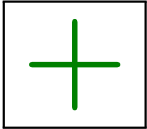
Alternatív részecskefajta, a miénkkel csak gravitációsan érintkező sötét anyag, keresése az LHC egyik fő feladata.

Lehetséges megoldás: szuperszimmetria (SUSY)

A problémákat (majdnem mindet) megoldaná, ha a fermionok és bozonok párban léteznének, azonos tulajdonságokkal (tömeg, töltés)



Szuperszimmetria: + és –



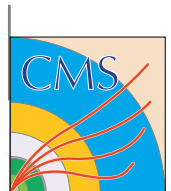
- elmélet természetessége
- Unverzum hideg, sötét anyaga (26 %):
legkönnyebb SUSY-részecske
- kölcsönhatások egyesítése
- gravitáció is beilleszthető

DE:



- SUSY-sértés mechanizmusa ??
- Sok különböző SUSY-modell
- Rengeteg új paraméter
- $\tilde{m} \sim 1000$ GeV alatt nem látunk SUSY-részecskét

Még jó, hogy a SUSY-t már 50%-ig felfedeztük!!
(a SUSY-részecskék felét (az extra Higgsek híján) látjuk)

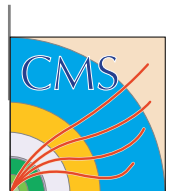


Még rengeteg modell van!



Új fizika keresése az LHC-nál

1. Indulás: Értsük meg a *detektort*: működés, trigger, kalibráció
2. Mennyire hiteles a *szimulációnk*? Leírja a SM folyamatait és a detektort? Egyezik a mért eloszlásokkal?
3. Keresd, amit vársz, vedd észre, amit nem vársz. Látunk *eltérést (többletet)* valamilyen eloszlásban a háttérszimulációhoz képest? Új fizika vagy hibás háttérbecslés?
4. Új fizika! Keresünk levágást valamilyen tömegeloszlásban.
5. Ha tényleg új fizika: SUSY vagy valami más? Melyik modell? Milyen paraméterekkel?



Antianyag: hova lett?

Minden anyagi részecskének van antirészecskéje

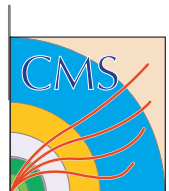
Pl. proton (a hidrogénatom magja) \Leftrightarrow antiproton.

Ha részecske antirészecskéjével ütközik, megsemmisülnek, energiájuk szétsugároz.

Sugárzás atommag terében részecske + antirészecske párokat tud kelteni.

Kisebb energián elektron-pozitron párt, nagy energián pl. ($E > 2$ protontömeg) proton-antiprotont.

Nincsenek antianyag-csillagok: ősrobbanás után hova lett az antianyag?



A CERN antianyaggyára



A CERN antianyaggyára (AD)

az anyag–antianyag szimmetria ellenőrzésére
épült



Hat antianyag–kísérlet az AD-nál, antiprotonos atomok, antihidrogén vizsgálata.
Antihidrogén: antiproton és antielektron (pozitron)

ASACUSA: Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons



Barna Dániel, Radics Bálint, Sótér Anna, Tőkési Károly, Horváth Dezső
Tokió, Aarhus, Bécs, Brescia, Budapest, Debrecen, München



Antihidrogén-nyaláb

ASACUSA: MUSASHI



Monoenergetic
Ultra
Slow
Antiproton
Source for
High-precision
Investigations



5.8 MeV \bar{p} AD \Rightarrow RFQ

100 keV \bar{p} RFQ \Rightarrow csapda (2001)

$> 10^6$ \bar{p} csapdában hűtve (2002)

~ 350000 lassú \bar{p} kivezetve (2004)

Csapdázott \bar{p} összenyomva (2008)

(5×10^5 \bar{p} , $E = 0.3$ eV, $R = 0.25$ mm)

\bar{H} -nyaláb: ASACUSA, 2010-16



Mennyi az antianyag a világegyetemben?

AMS-2: Alpha Magnetic Spectrometer

antianyag (anti-hélium) és sötét anyag felfedezésére

Vezetője Samuel Chao Chung Ting
(Nobel-díj, 1976)

Össztömeg: 8500 kg,
1200 kg állandó mágnes

Költsége: 2 G\$

Építés: CERN

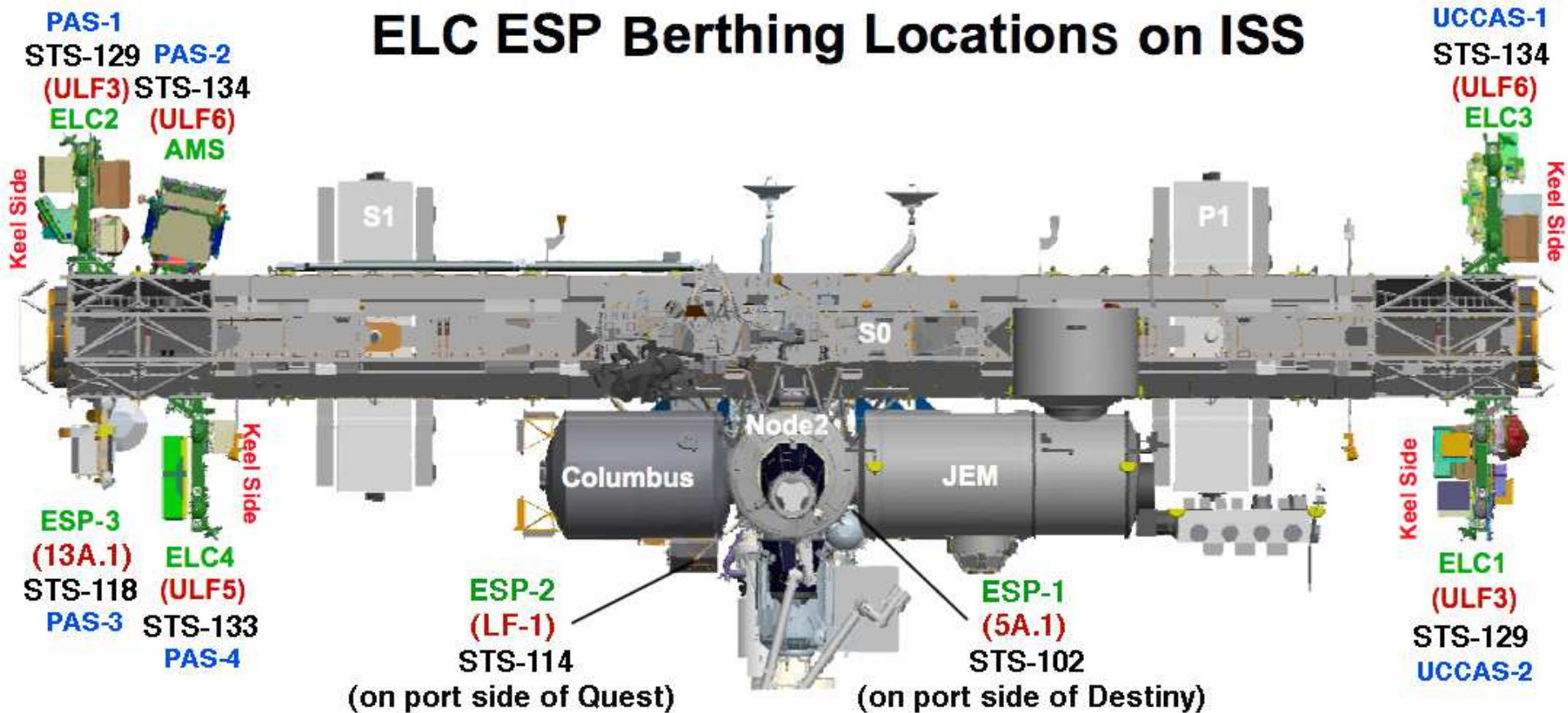
Fellőve: 2011 május, USA

Vezérlés: CERN



AMS-2: Alpha Magnetic Spectrometer

ELC ESP Berthing Locations on ISS



Első eredmények (2013–15):

Antihéliumot nem látni.

Nagyenergiás pozitronok mindenhol.

Jöhetnek a sötét anyag szétsugárzásából vagy pulzárokból.

Még 10-15 évig gyűjt adatot.



AMS-02 a nemzetközi űrállomáson



Készült 2017. január 26-án, űrséta közben (NASA).

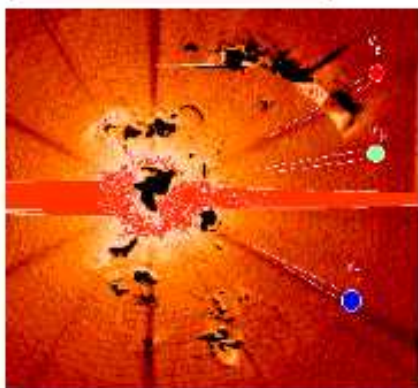


Neutrínóforrások



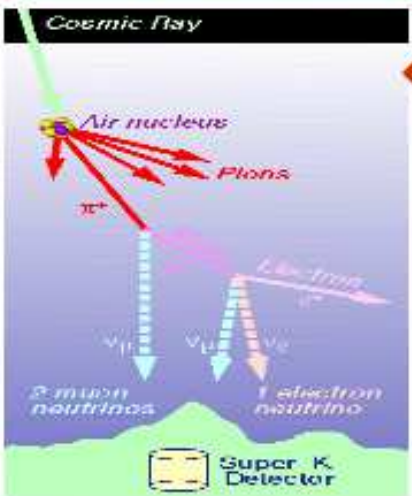
← Nap

Kozmikus →



← Kozmológia

Reaktor →



← Léggör

Gyorsító →

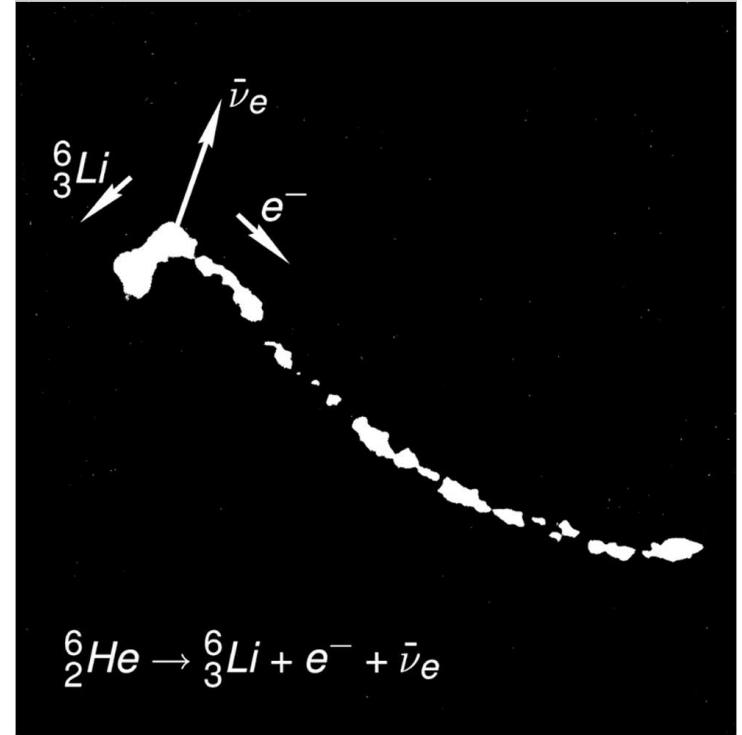
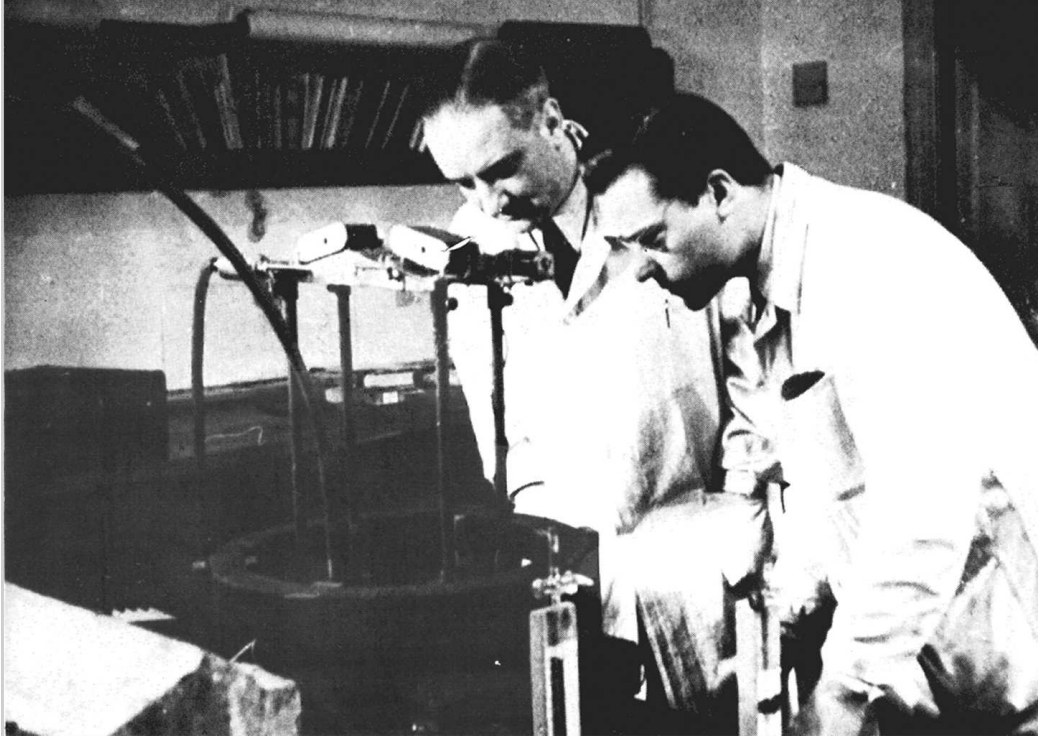


← Föld

Neutrínós Nobel-díjak

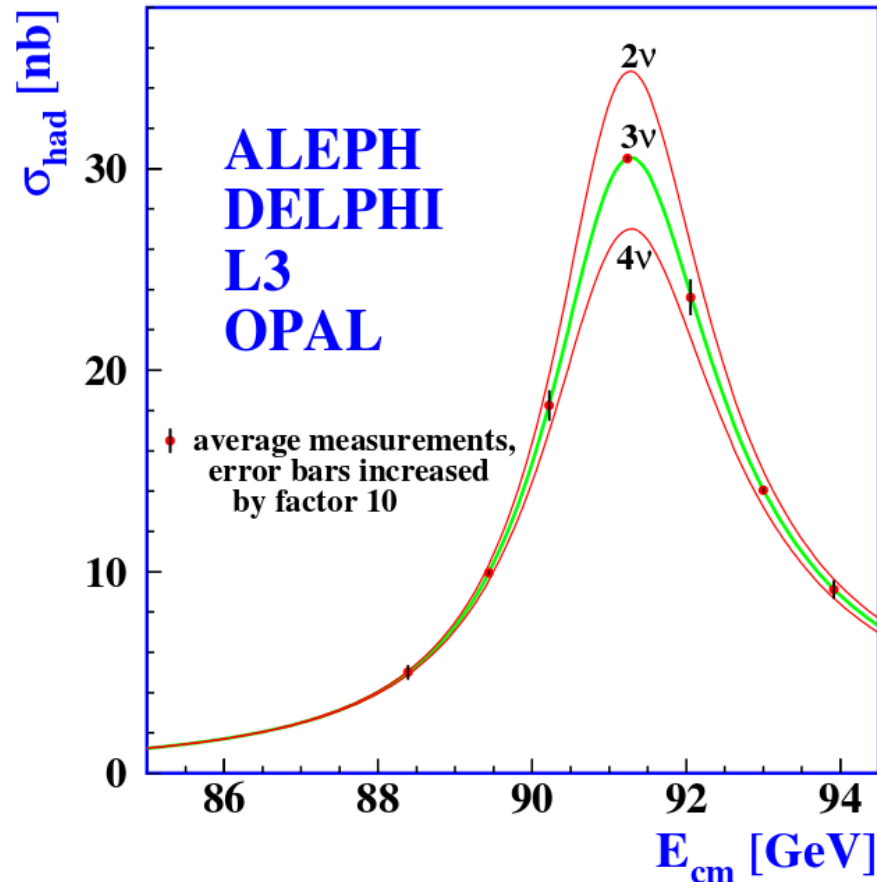
- 1988: Leon M. Lederman, Melvin Schwartz and Jack Steinberger „for the neutrino beam method and the demonstration of the doublet structure of the leptons through the discovery of the muon neutrino”. (Cikk: 1962)
- 1995: Martin L. Perl (1977) „for the discovery of the tau lepton” and Frederick Reines (1956) „for the detection of the neutrino”
- 2002: Raymond Davis Jr. (1968) and Masatoshi Koshiba (1987) „for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos”.
- 2015: Takaaki Kajita (1998) and Arthur B. McDonald (2002) „for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass”.

Debrecen, 1956: a $\bar{\nu}_e$ megfigyelése



Szalay Sándor és Csikai Gyula a ködkamrával, és az elektron-antineutrínó nyoma

A SM 3 könnyű neutrínója

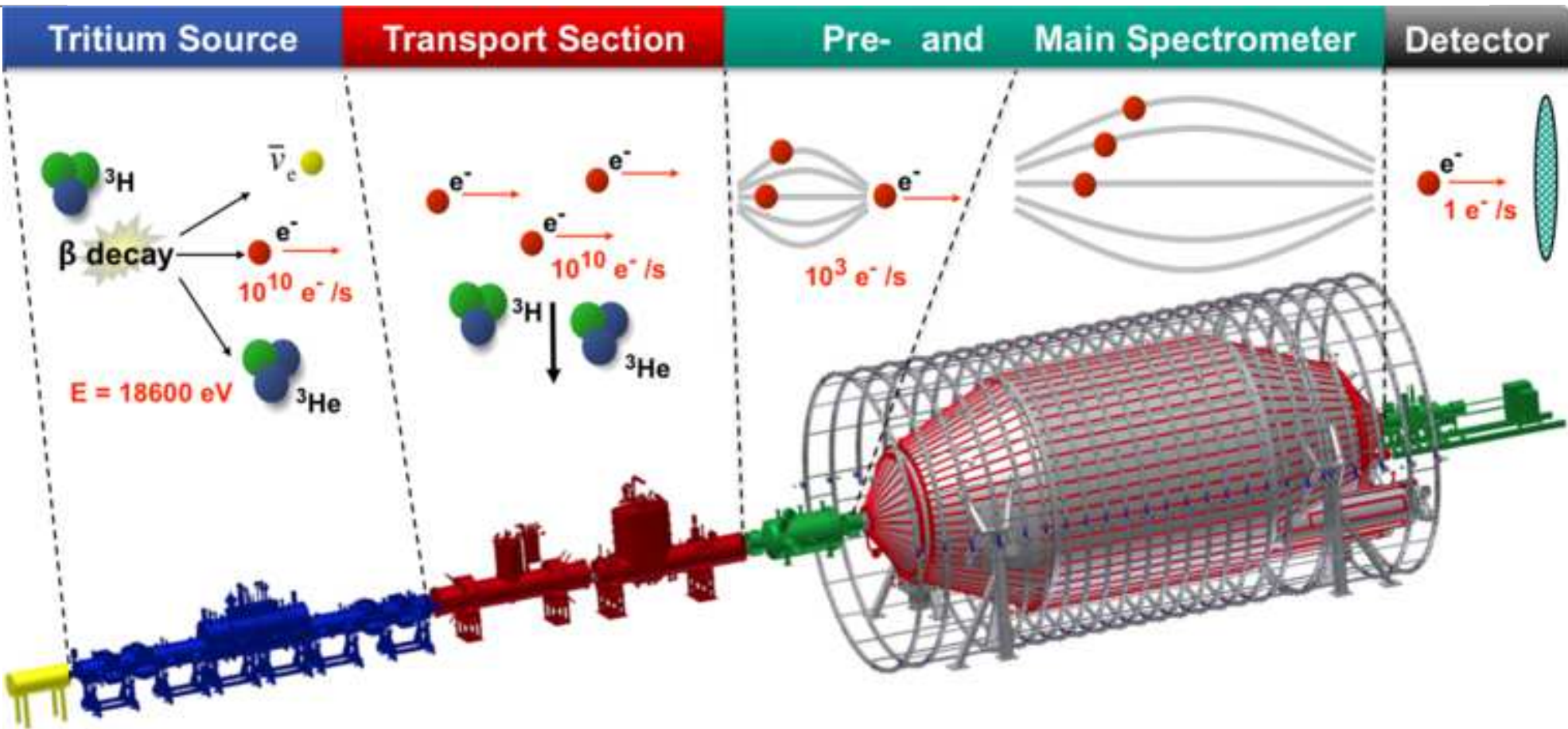


LEP: Z-bozon *láthatatlan* bomlási szélessége

Töltéskiegyenlítés miatt $N(\text{kvarkiz})=N(\text{lepton})$

Planck űrszonda megerősítette: csak 3 neutrínó van

Karlsruhe TRitium Neutrino: $M(\nu_e)$



Tritium decays, releasing an electron and an anti-electron-neutrino. While the neutrino escapes undetected, the electron starts its journey to the detector.

Electrons are guided towards the spectrometer by magnetic fields. Tritium has to be pumped out to provide tritium free spectrometers.

The electron energy is analyzed by applying an electrostatic retarding potential. Electrons are only transmitted if their kinetic energy is sufficiently high.

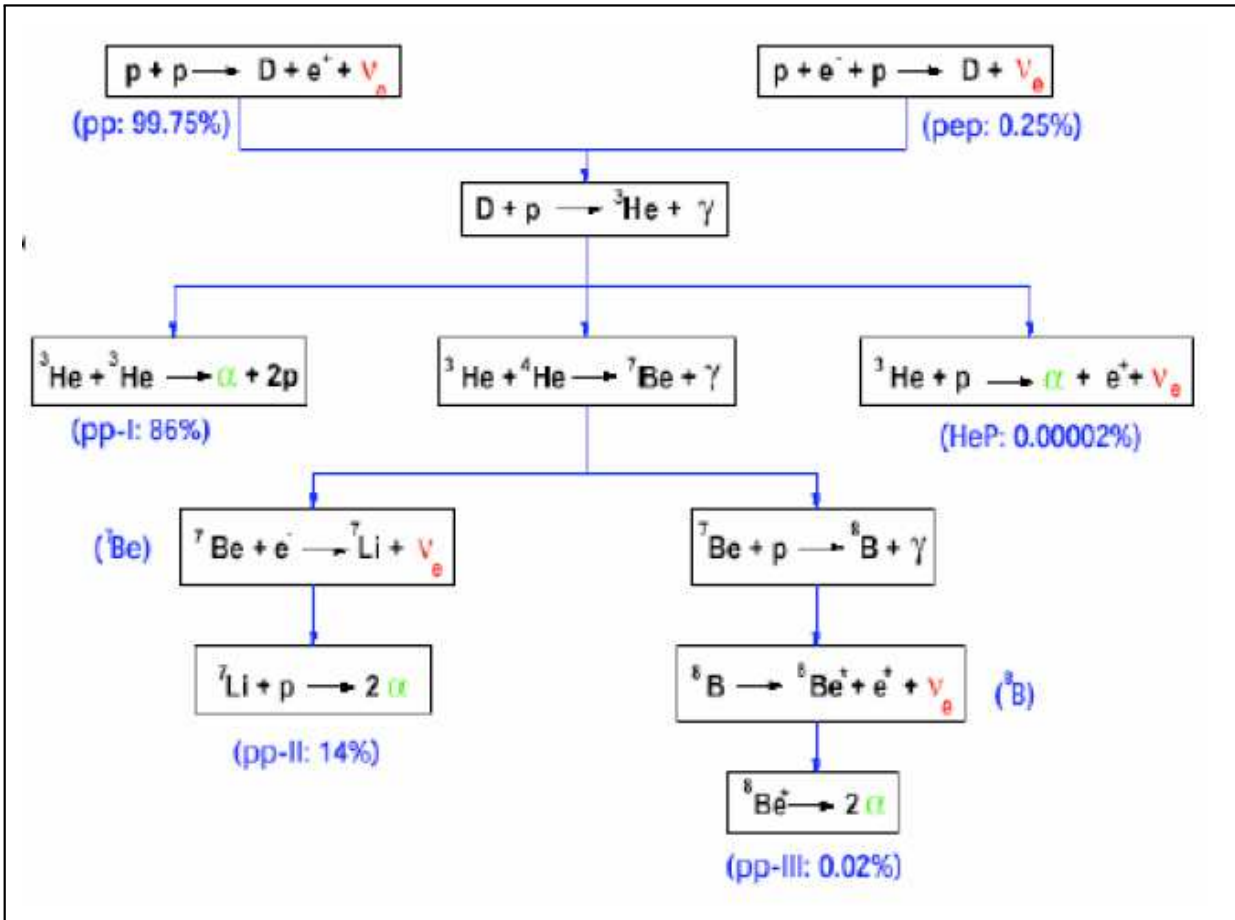
At the end of their journey, the electrons are counted at the detector. Their rate varies with the spectrometer potential and hence gives an integrated β -spectrum.

KATRIN szállítása: 400 ⇒ 9000 km



Deggendorf → Karlsruhe: Duna, tengerek, Rajna

Rejtély: a Nap neutrínói



Észlelési egység:

Solar Neutrino Unit 1 SNU = $\frac{10^{-36} \text{ v-kölcsönhatás}}{\text{atom} \cdot \text{sec}}$
 $\approx 1 \text{ v-kh/nap}/10^{30} \text{ atom}$
 (10 – 100 t anyag)

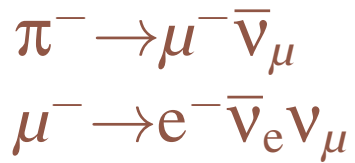
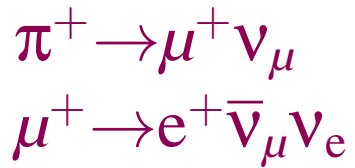
Mérés: $\nu_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
 R. Davis, 1968
 (Nobel-díj: 2002)

Várt: $8,2 \pm 1,8 \text{ SNU}$;
 mért: $2,56 \pm 0,23 \text{ SNU}$
 Elvesztek??

Kihűl a Nap?? Mi rossz: Napmodell vagy mérés?

Mindkettő megerősítve...

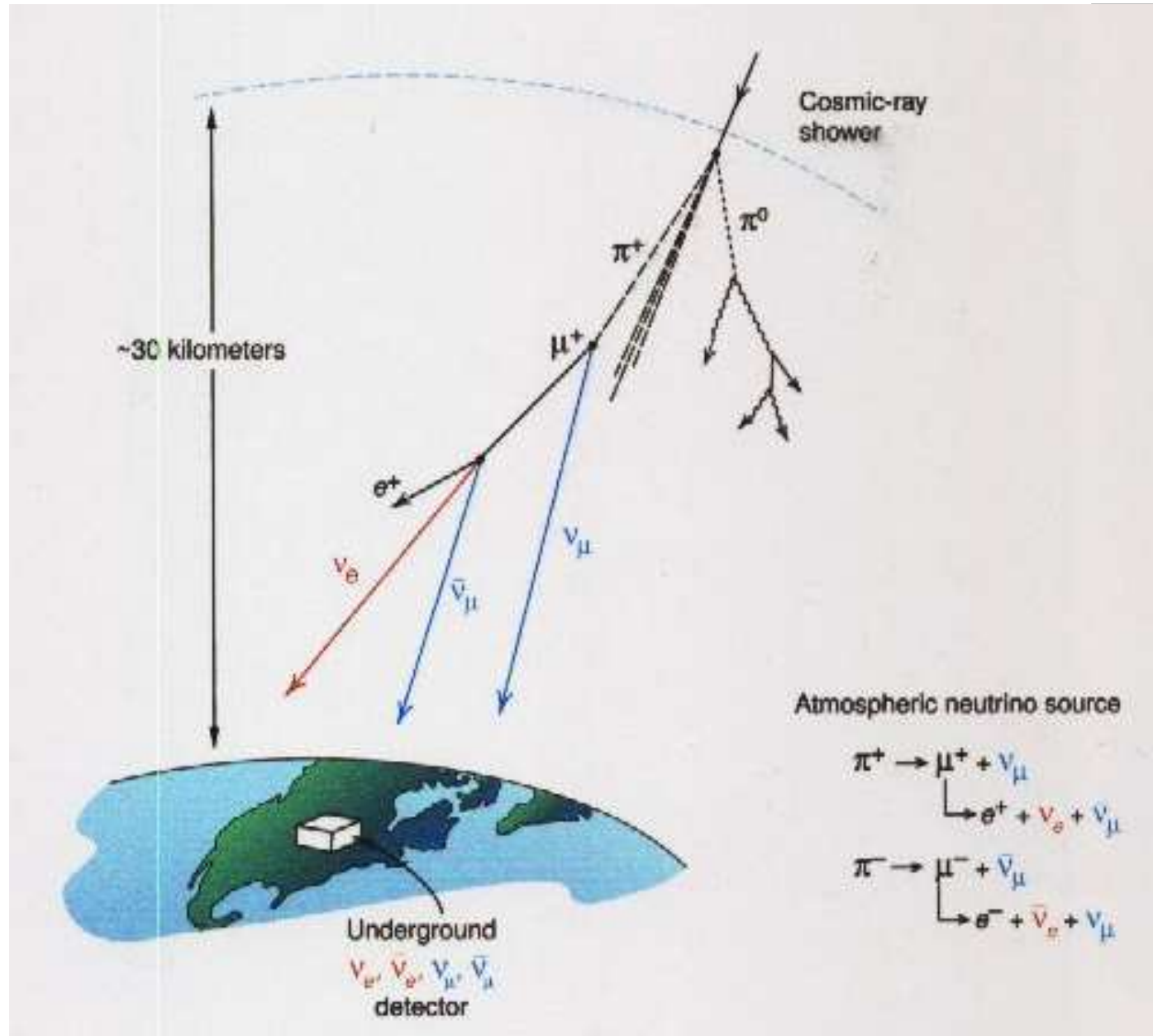
Rejtély: légköri neutrínók



Várt: $N_\mu/N_e \sim 2$

Mért: $N_\mu/N_e \ll 2$

Hova lesznek?

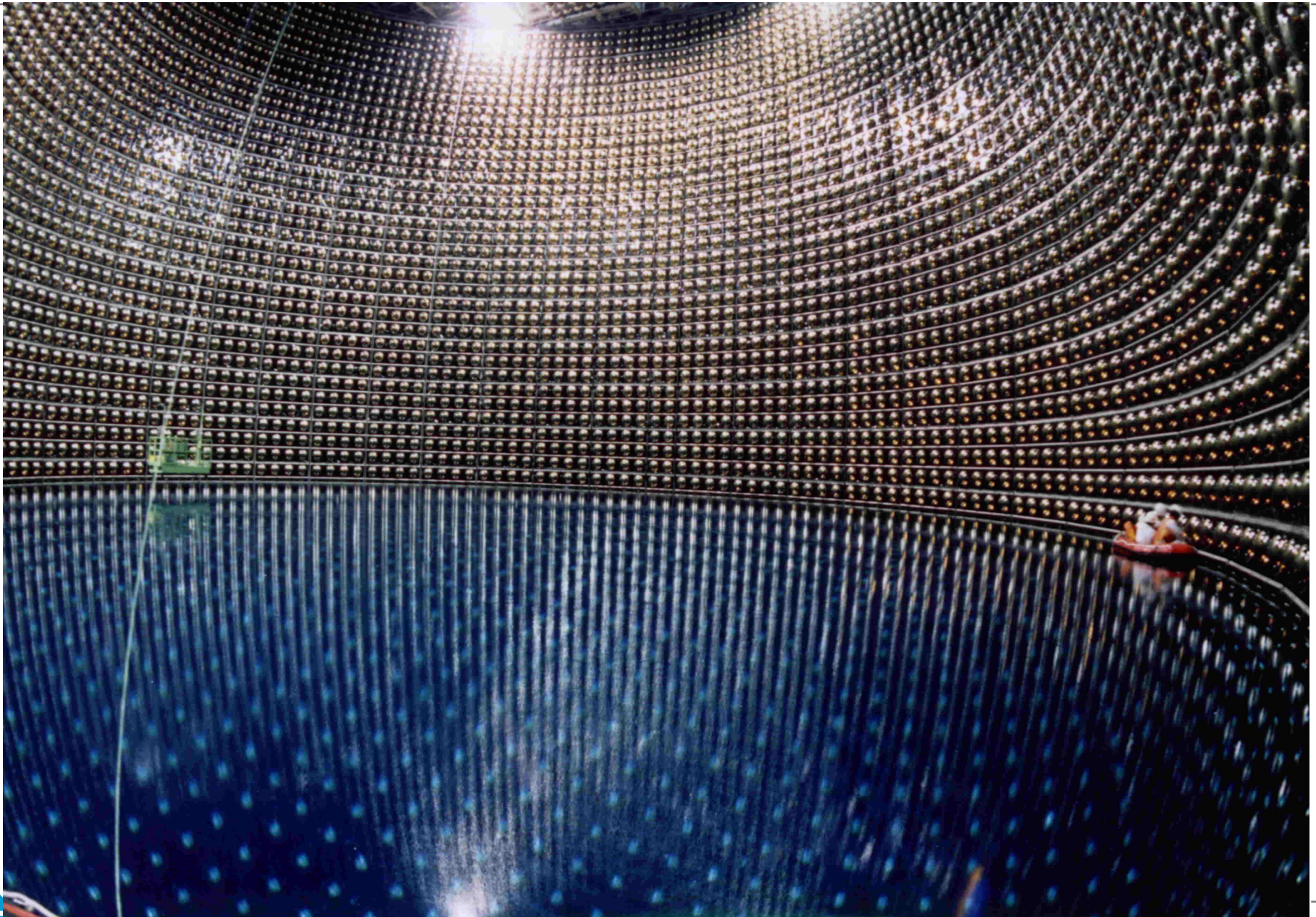


Rengeteg a neutrínó-kísérlet!



Bányában, alagútban, víz és jég alatt, reaktorok közelében

Szuper-Kamiokande belülről

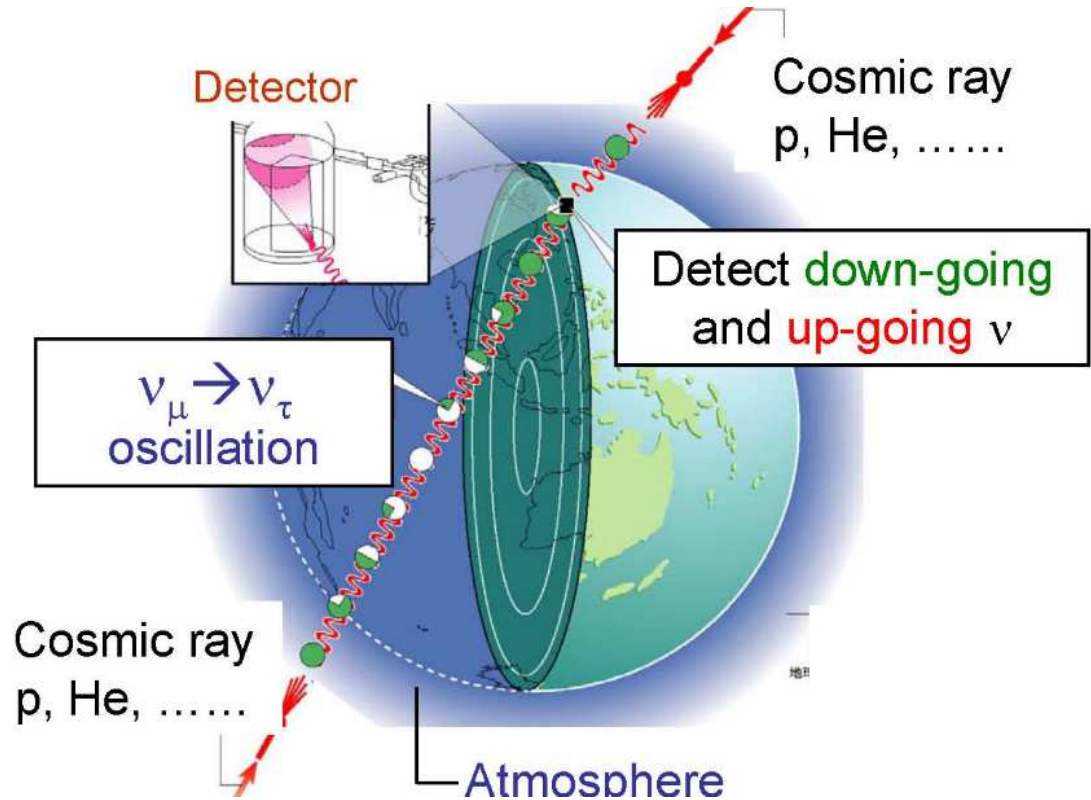


SKK: légköri neutrínók

Sok-GeV-es
műon-neutrínókra

$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ ízrezgés

Föld átmérőjén



$$\text{Fluxus föl/Fluxus le} = \frac{N(-1,0 < \cos \Theta < -0,2)}{N(0,2 < \cos \Theta < 1,0)} = 0,54 \pm 0,04$$

$$1,3 \times 10^{-3} \text{eV}^2 \leq \Delta M_{\text{atm}}^2 \leq 3,0 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

Nobel-díjak: KOSIBA Maszatosi, 2002 és KADZSITA Takaaki, 2015.

Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

Creighton-bánya,
Sudbury, Kanada:

$h = -2$ km

Kinn: 7500 t H₂O

Benn: 1000 t 99,92%

D₂O

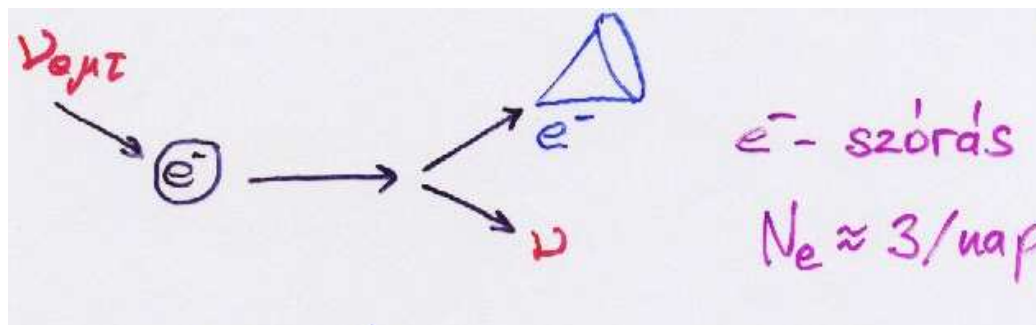
2001-03: +2 t

Na³⁵Cl

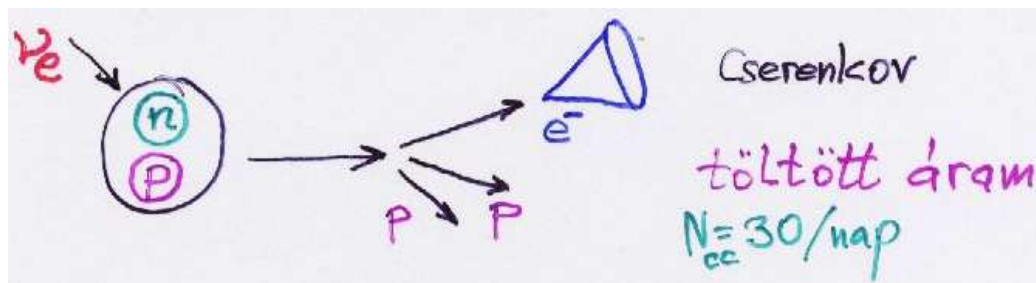
Azonosítható:

ν_e mind és $\bar{\nu}_e$ külön

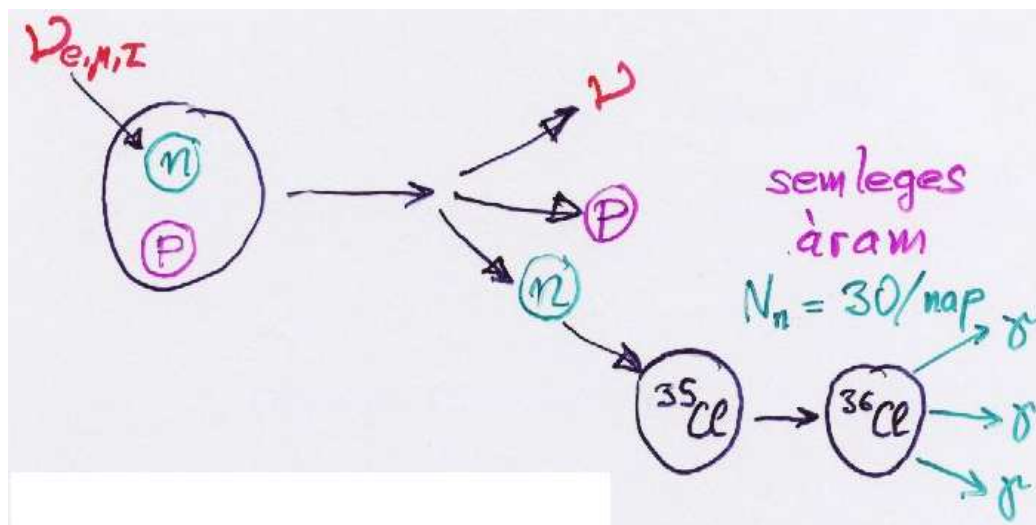
Nap- és légköri ν



Elektron-
szórás



Töltött
áram



Semleges
áram



A SNO detektorrendszer

1000 tonnes D_2O

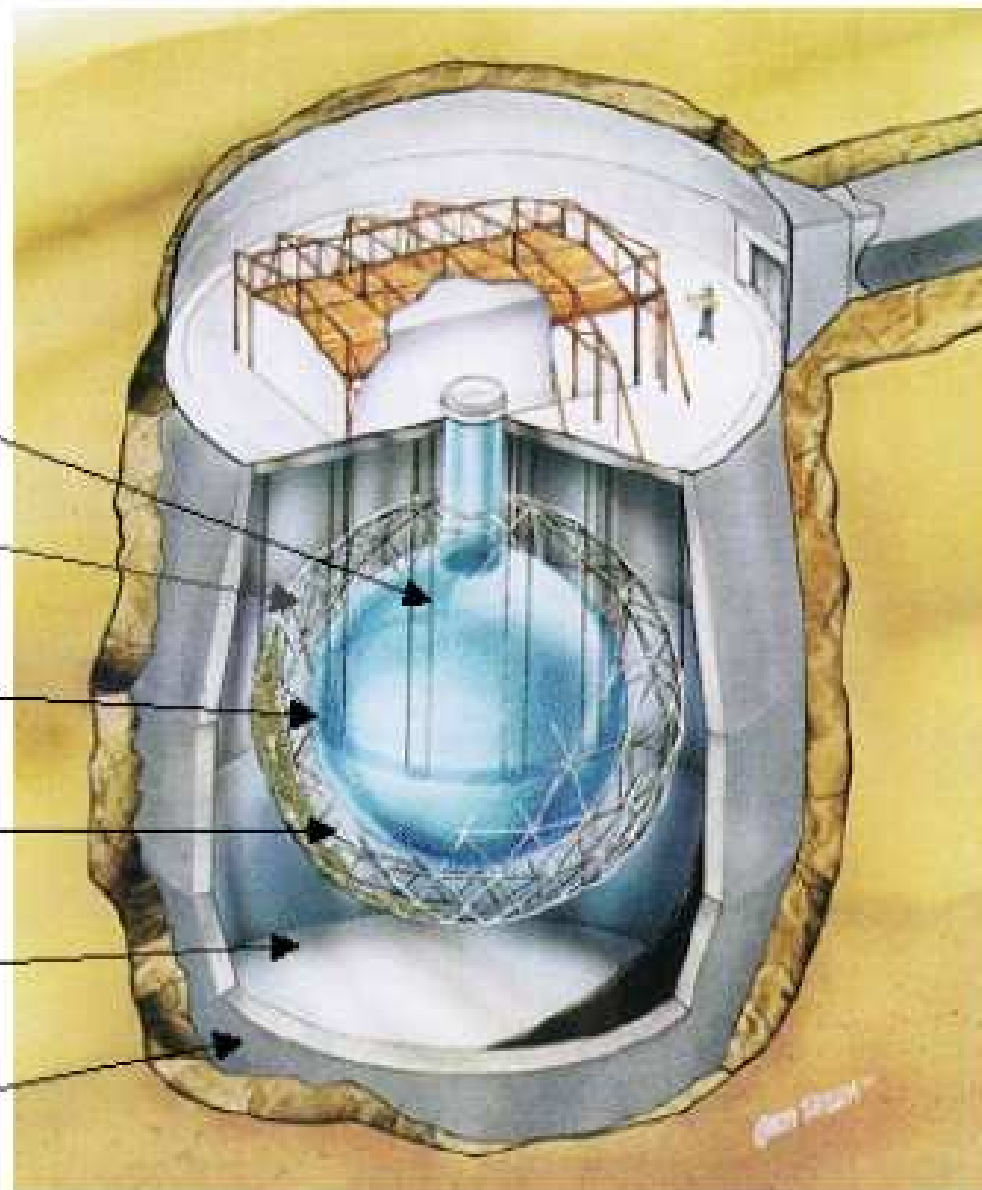
Support Structure
for 9500 PMTs,
60% coverage

12 m Diameter
Acrylic Vessel

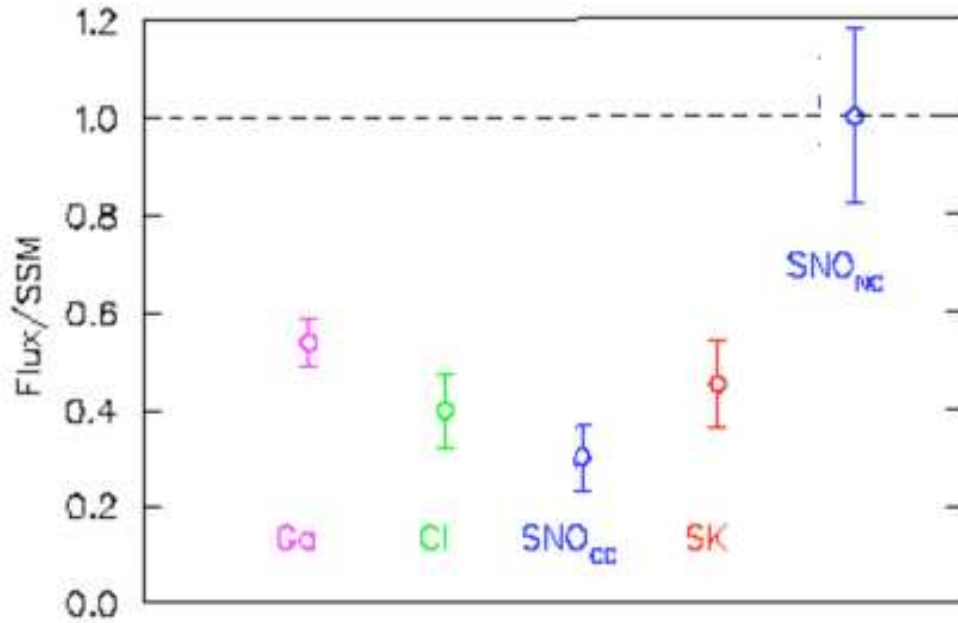
1700 tonnes Inner
Shielding H_2O

5300 tonnes Outer
Shield H_2O

Urylon Liner and
Radon Seal



SNO: a nap-neutrínók



Teljes fluxus \approx elmélet

ν_e eloszcollál

$$\Delta M^2 = 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\Theta = 30^\circ$$

$$L_{\text{osc}} [\text{km}] = 2\pi \frac{E [\text{GeV}]}{1,27 \Delta M^2 [\text{eV}^2]}$$

Légköri neutrínók: $\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$ ízrengés Föld átmérőjén

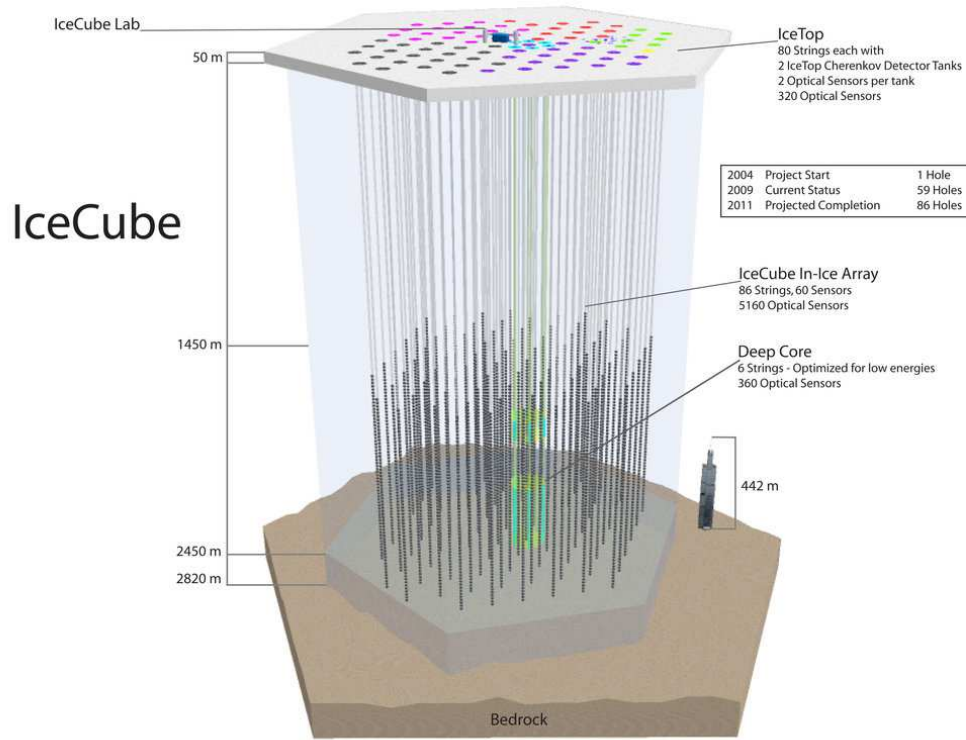
Nap-neutrínók: $\nu_e \Leftrightarrow \nu_X$ ízrengés Nap-Föld távolságon

Legalább két neutrínóra $m_\nu > 0$!

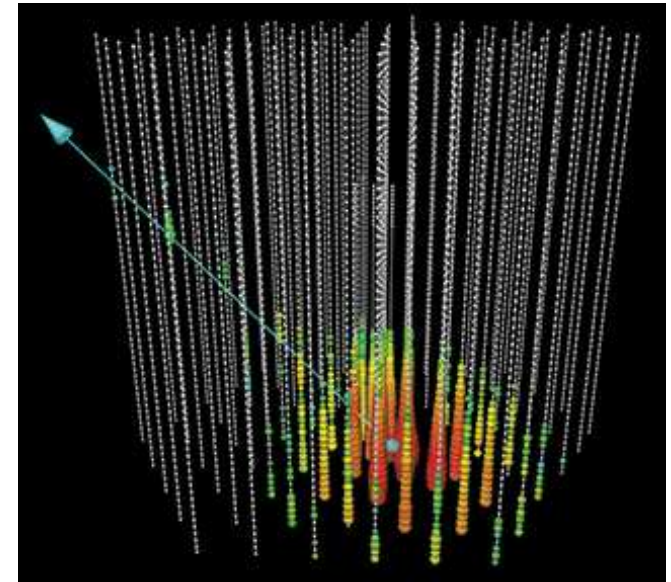
Nobel-díj: Arthur B. McDonald, 2015



IceCube: 2.8 km az Antarktisz jegében

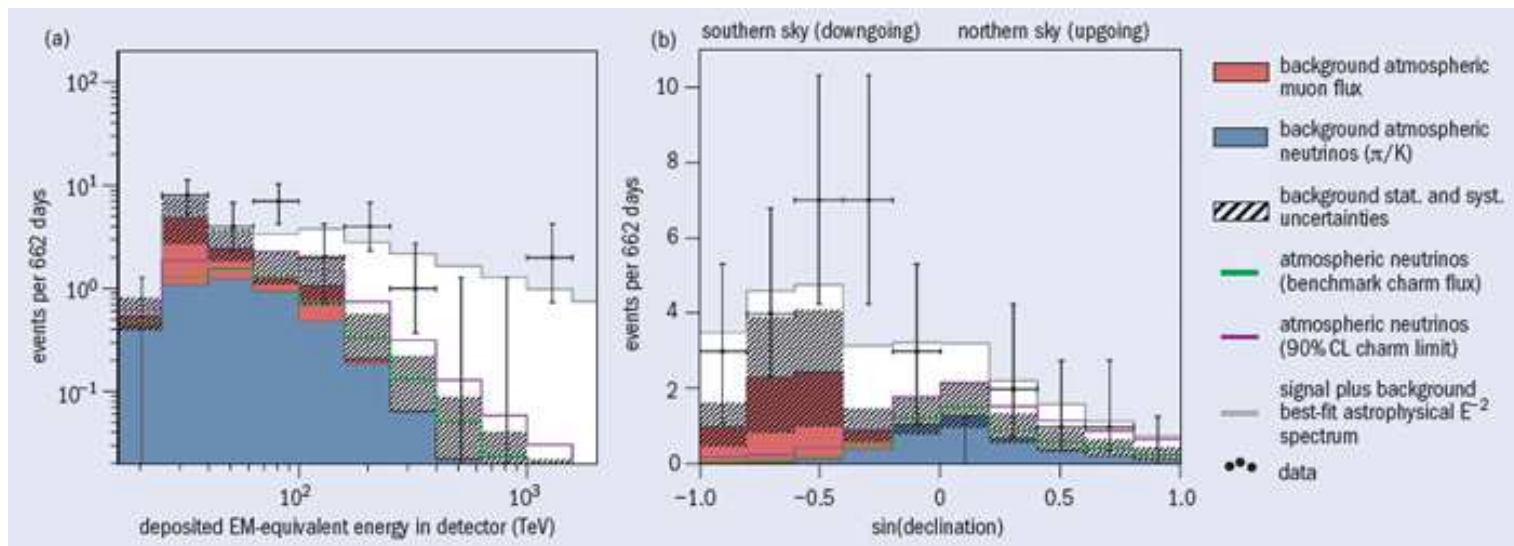


2011
↓
2013



250 TeV-es neutrínó

$E_\nu = 1060 \text{ TeV!}$



Honnan van a neutrínók tömege??

A neutrínó ízrezgése rejtélyes, hiszen csak egyféle kölcsönhatása ismeretes, nem szabadna kevert állapotának lennie.

A neutrínótömegek kilógnak a standard modellből, sértenünk kell vagy hozzáadnunk, hogy magyarázzuk.

- ν_R és $\bar{\nu}_L$ hipertöltése $Y = 0$, steril (nincs párban töltött leptonnal)? Olyant nem látunk (LSND-kísérlet?)
- Majorana-részecske, $\nu = \bar{\nu}$?
- Több BEH-mező van, hogy tömeget adna neki?
- Ötödik erő keveri?
- Miért olyan kicsi? Seesaw mechanizmus: Könnyű Dirac + nehéz steril?

Ízrezgés csak ΔM_ν^2 -et ad $M_\nu < 2 \text{ eV}$ (trícium-bomlás)

Részecskefizikai módszerek *haszna*

- Világháló: CERN, 1989 \Rightarrow nagyvilág: 1994–
- Pozitronemissziós tomográfia az orvosi diagnosztikában
- Részecskegyorsítók fele (cca. 7000!) gyógyászatban
- ... másik fele mikroáramkörök gyártásában
- Mikrofizikában kb. 120 gyorsító
- Grid-hálózatok a számítástechnikában, orvostudományban

Éljen a részecskefizika!



Agymenők fizikája: David Saltzberg (UCLA, CMS)

Éljen a kísérleti részecskefizika!

Alap kutatás, közvetlen gyakorlati haszna nem várható.

De élesíti az elmét, pedagógiai haszna óriási:

- Technika élvonala, gyári szervezettség
- Kreatív gondolkodásra serkent
- Az óriási méretek miatt komoly technikai fejlesztéseket indukál: **100000 egyforma műszerre tender!**
- Óriási apparátus \Leftrightarrow munka kis csoportokban
- Élenjáró programozástechnikai gyakorlat: bankok előszeretettel alkalmaznak részecskefizikai doktorátust szerzett fizikusokat (**rossz nyelvek szerint ennek volt köszönhető a 2009-es bankválság**)

Rengeteget dolgozunk, érdekes dolgokat csinálunk, világot látunk (és van, aki haza is jön idővel...)

Meg van, aki Nobel-díjat kap

Konklúzió helyett

"Van egy elmélet, miszerint, ha egyszer kiderülne, hogy mi is valójában az Univerzum, és mit keres itt egyáltalán, akkor azon nyomban megszűnne létezni, és valami más, még bizarrabb, még megmagyarázhatatlanabb dolog foglalná el a helyét"

"Van egy másik elmélet, amely szerint ez már be is következett"

Douglas Adams: *Vendéglő a világ végén* (Nagy Sándor fordítása)

Köszönöm a figyelmet

Köszönöm a figyelmet

Három filmrészlet a CERN-ről és a részecskefizikáról:

Az Angyalok & Démonok 4-perces filmrészlete az LHC-ről

Kate McAlpine: *Large Hadron Rap* az LHC kísérleteiről

Antonio Capella dala a részecskefizika elméletéről

Köszönetnyilvánítás

- Néhai Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal
- Magyar Tudományos Akadémia
- OTKA K103917 és K109703
- Megértő és segítőkész együttműködő partnereink